

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA FASE OPERACIONAL  
DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL SUSTENTÁVEL**

**Gabriela Vandri Rabaça**

**Orientador: Msc. Guilherme Marcelo Zanghelini  
Coorientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares**

**2015/2**





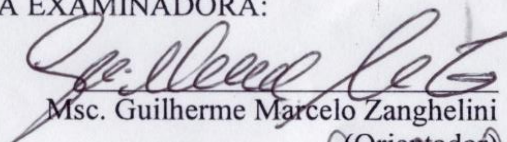
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA  
E AMBIENTAL

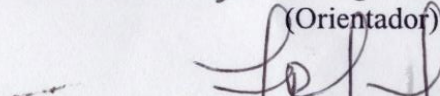
ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA FASE OPERACIONAL DE  
UM EDIFÍCIO COMERCIAL SUSTENTÁVEL

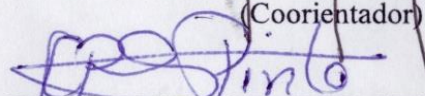
GABRIELA VANDRI RABAÇA

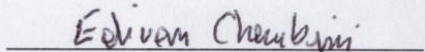
Trabalho submetido à Banca Examinadora  
como parte dos requisitos para Conclusão do  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária  
e Ambiental–TCC II

BANCA EXAMINADORA:

  
Msc. Guilherme Marcelo Zanghelini  
(Orientador)

  
Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares  
(Coorientador)

  
Prof. Dra. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto  
(Membro da Banca)

  
Dr. Edivan Cherubini  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
DEZEMBRO/2015

Rabaça, Gabriela Vandri

Análise do ciclo de vida da fase operacional de um edifício comercial sustentável / Gabriela Vandri Rabaça ; orientador, Guilherme Marcelo Zanghelini ; coorientador, Sebastião Roberto Soares. - Florianópolis, SC, 2015.

91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Análise do Ciclo de Vida (ACV). 3. Edifício Sustentável. 4. Impacto Ambiental. 5. Fase de Uso ou Operacional. I. Zanghelini, Guilherme Marcelo . II. Soares, Sebastião Roberto . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio incondicional. Por serem meus exemplos e espelhos durante toda a vida, e de quem tenho tentando seguir os passos em busca do meu próprio caminho.

Aos meus irmãos, Rafael e Daniel, pela parceria, pela mão direita sempre estendida e por toda felicidade partilhada.

Ao Edgar Favaretto por estar sempre ao meu lado, não medindo esforços para me ajudar a alcançar meus - nossos - objetivos.

Ao meu orientador, Guilherme, pelo direcionamento ao longo de todo este trabalho e pelo apoio e prestatividade a todos os momentos. Os conhecimentos e experiência partilhados foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Aos membros do grupo de pesquisa CICLOG, que partilharam e enriqueceram de conhecimentos e experiências a temática abordada aqui.

Aos meus ex-orientadores de estágio na França, Dr. Michael Tsang e Prof. Guido Sonnemann, que me mostraram e ensinaram pela primeira vez e prática da ACV, graças ao incentivo e paixão de ambos pela pesquisa nesta área que houve motivação para concepção deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Catarina, representada pelo corpo docente e vários colegas, a caminhada foi plena e a vivência vai deixar saudades.

Aos amigos da turma de Engenharia Sanitária e Ambiental do ano de 2010.1, pelo trabalho sempre conjunto e solidariedade na resolução de quaisquer assuntos acadêmicos e pessoais. Em especial a Júlia Schramm, Thauana Mendes, Rita Grhos, Gabriela Silva, por fazerem esses anos tornarem-se inesquecíveis.



*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,  
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. ”*

(Francisco Cândido Xavier)





## RESUMO

As edificações constituem uma das maiores fontes de degradação ambiental, devido ao grande consumo de recursos naturais e emissões poluentes. Com a finalidade de reduzir essa problemática, iniciou-se a concepção de edificações sustentáveis, comprovadas por certificações ambientais. No Brasil, no entanto, os processos de certificação existentes podem não ser suficientes para julgar a “verdadeira” sustentabilidade de um edifício. Por isso, o presente trabalho utilizou a metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar e analisar a contribuição dos impactos ambientais de uma edificação comercial no Brasil, a qual possui características sustentáveis asseguradas via certificado LEED. A análise foi delimitada para a fase de uso, por esta possuir maior relevância sobre as demais em termos de danos ambientais. Os fluxos do sistema de produto foram inventariados com dados primários das atividades de geração de resíduos e efluentes, consumo de água e energia, transporte de funcionários e manutenção, correspondentes a um ano de operação. Essas informações foram associadas a potenciais impactos, gerando subsídios capazes de definir a magnitude dos impactos ambientais das atividades. Os resultados mostram que o consumo de energia, em particular a eletricidade, e o transporte de funcionários, devido ao uso de automóveis, são as atividades mais prejudiciais, respondendo juntas por 75-95% dos impactos, influenciando majoritariamente no aquecimento global e na depleção da camada de ozônio, respectivamente. Propostas de melhorias foram simuladas através de cenários mais sustentáveis, com a finalidade de mitigar ambos os gargalos. Se uma parte da eletricidade do edifício for produzida por energia solar e os funcionários substituírem o uso do carro por transportes alternativos, os impactos serão mitigados de forma significativa, chegando a reduzir até 30% dos impactos, podendo, ainda, favorecer uma certificação mais valorizada ao empreendimento. Neste trabalho foi possível investigar a qualidade ambiental da etapa de uso do edifício, com a diretiva de mensurar seu desempenho, quantificar seus impactos e avaliar a redução da carga ambiental se alternativas compensatórias forem adotadas. Os resultados poderão auxiliar a tomada de decisão dos responsáveis pelo edifício e demais envolvidos, em prol de uma gestão mais sustentável.

**Palavras-chave:** Análise do Ciclo de Vida (ACV); Edifício Sustentável; Impactos Ambientais; Fase de Uso ou Operacional.



## ABSTRACT

The buildings industry is one of the major sources of environmental degradation due to the large consumption of natural resources and polluting emissions. In order to reduce this issue, the concept of sustainable buildings was initiated, attested by environmental certifications. However, the existing certification processes in Brazil may not be enough to claim the 'true' sustainability of a building. Therefore, the present work used the methodology of Life Cycle Analysis (LCA) to quantify and analyze the contribution of environmental impacts of a commercial building in Brazil, which has its sustainable features ensured through the LEED certificate. The analysis was set out to the use phase, since it has a higher relevancy over the others in terms of environmental damage. The product system flows were inventoried with primary data from waste and wastewater generation, consumption of water and energy, transport of employees and maintenance, corresponding to a year of operation. This information was associated with potential impacts, which generated subsidies that allowed to define the magnitude of the environmental impacts of the activities. The results show that the energy consumption, electricity in particular, and transport of employees, due to the use of automobiles, are the most harmful activities, together accounting for 75-95% of impacts, whose most influential categories are global warming and ozone layer depletion, respectively. Environmental improvements were simulated through more sustainable scenarios, in order to mitigate both damaging activities. If part of the building's electricity could be produced by solar energy and the employees replace the use of the cars for alternative transports, the impacts would be lessened significantly, reaching a reduction up to 30% and may even promote a more valued certification for the building. In this work it was possible to investigate the environmental quality of buildings, with the directive to measure their performance, quantify their impact and evaluate the reduction of environmental burden if compensatory measures were adopted. The results can help the decision-makers and other stakeholders towards a more sustainable management.

**Key words:** Life Cycle Assessment (LCA), Sustainable Building; Environmental impacts; Use or Operational phase.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de vida de um produto.....	24
Figura 2 - Estrutura de uma ACV. ....	25
Figura 3 – Fluxos de entradas e saídas de um sistema na ACV. ....	27
Figura 4 – Princípios de sustentabilidade em edificações. ....	29
Figura 5 - Evolução de registros e certificações LEED no Brasil. ....	31
Figura 6 – Aplicações e vantagens da ACV em edificações. ....	34
Figura 7 - Sequência do ciclo de vida de uma edificação. ....	35
Figura 8 – Energia total, operacional e embutida em edificações convencionais e de alta eficiência em diversos estudos de caso. ....	36
Figura 9 – Edifício do Office Park, Florianópolis/SC. ....	40
Figura 10 – Certificação LEED nível prata do edifício. ....	41
Figura 11 - Fronteira do sistema delimitada pelas principais atividades da etapa operacional. ....	43
Figura 12 – Fluxograma da fase de uso do edifício. ....	48
Figura 13 – Panorama geral dos impactos ambientais da fase de uso do edifício para todas as categorias do método TRACI 2.0. ....	56
Figura 14 – Impactos ambientais da fase de uso do edifício por categoria. ....	56
Figura 15 – Contribuição de impactos de cada atividade operacional. .	57
Figura 16 – Contribuição de impactos dos consumos finais de energia.60	
Figura 17 – Redução de impactos dos cenários energéticos. ....	64
Figura 18 - Redução de impactos dos cenários de transporte. ....	65
Figura 19 – Alternativas de redução de impactos otimista e provável. .	66



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estado da arte da ACV para edificações comerciais.....	37
Tabela 2 – Indicadores, emissões e escala geográfica das categorias de impacto.....	47
Tabela 3 – Inventário do edifício com valores na unidade funcional, m2/ano.....	49
Tabela 4 – Energia operacional média de edifícios comerciais.....	51
Tabela 5 - Quilometragem total rodada por ano para cada transporte...	52
Tabela 6 – Caracterização quali-quantitativa dos resíduos recicláveis.	54
Tabela 7- Quantificação dos impactos ambientais. ....	58
Tabela 8 – Pontuação LEED correspondente a porcentagem de otimização da performance operacional em cada cenário. ....	63
Tabela 9 – Número de funcionários que utiliza cada meio de transporte nos cenários avaliados.....	65
Tabela 10 – Pontuação LEED correspondente as alternativas .....	67





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AC- Acidificação  
ACV - Análise de Ciclo de Vida;  
ACVE - Análise de Ciclo de Vida Energético;  
AG – Aquecimento Global  
AICV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida  
AQUA- Alta Qualidade Ambiental  
BEN- Balanço Energético Nacional  
CASAN- Companhia Catarinense de Águas e Saneamento  
CELESC- Centrais Elétricas de Santa Catarina  
CEN- Comitê Europeu de Normalização  
CGIEE - Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética  
CIB - *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*  
CICLOG - Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida  
CIWMB- *California Integrated Waste Management Board*  
COMCAP- Companhia Melhoramentos da Capital  
DCO- Depleção da Camada de Ozônio  
EPA- *Environmental Protection Agency's*  
ETE- Estação de Tratamento de Efluentes  
EU- Eutrofização  
GBCB- *Green Building Council Brasil*  
GEE - Gases de Efeito Estufa  
ICV – Inventário do Ciclo de Vida  
INMETRO- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
ISO- *International Organization for Standardization*  
LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*  
MME – Ministério de Minas e Energia  
PBE- Programa Brasileiro de Etiquetagem  
PNRS- Política Nacional de Resíduos Sólidos  
PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
SAIC- *Scientific Applications International Corporation*  
SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
UNEP- *United Nations Environment Programme*  
USEPA- *United States Environmental Protection Agency*  
USGBC- *United States Green Building Council*  
WGBC- *World Green Building Council*



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	Objetivo Geral.....	23
1.1.2	Objetivos Específicos.....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
2.1	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA: CONCEITOS E ETAPAS DE UMA ACV.....	24
2.1.1	Definição de Objetivo e Escopo.....	25
2.1.2	Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) .....	26
2.1.3	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) .....	27
2.1.4	Interpretação dos Resultados .....	28
2.2	EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS E CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS .....	29
2.3	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA APLICADA PARA EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS.....	32
2.3.1	Estado da arte de estudos de ACV para edifícios .....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
3.1	OBJETIVO E ESCOPO.....	39
3.1.1	Escolha e caracterização do produto edifício comercial sustentável .....	40
3.1.2	Fronteiras do sistema .....	42
3.1.3	Unidade Funcional .....	43
3.2	INVENTÁRIO.....	44
3.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS.....	45
3.4	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1	ANÁLISE DO INVENTÁRIO.....	48
4.2	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS.....	55
4.3	GARGALOS DO SISTEMA.....	59
4.3.1	Energia.....	60
4.3.2	Transporte .....	61

4.4	ANÁLISE DE CENÁRIOS.....	62
5	CONCLUSÕES.....	67
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS...	70
	REFERÊNCIAS.....	71
	APÊNDICE - Medidas Mitigadoras.....	87

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as consequências das atividades antrópicas sobre o meio ambiente direcionou, nas últimas décadas, uma discussão global à procura de estratégias de redução de impactos ambientais e aplicação do conceito da sustentabilidade. A indústria da construção civil tem sido o foco principal destas discussões, visto que as edificações são uma das maiores fontes consumidoras de recursos naturais no mundo e a forma que elas são projetadas, construídas e utilizadas influencia diretamente no esgotamento destes.

John (2000) relata que o volume de energia, água e matérias-primas utilizado pela construção civil corresponde, no mínimo, a um terço do total consumido anualmente por toda a sociedade. A crescente demanda pela urbanização e, conseqüentemente, o surgimento de novas obras, tende a piorar este cenário. O ambiente construído chega a absorver até 50% dos recursos naturais e 40% da demanda de energia dos países, sendo que aproximadamente 60% da eletricidade mundial é consumida, exclusivamente, por edifícios residenciais e comerciais (CHENG, CHIANG e TANG, 2006; JOHN 2000; RODE, BURDETT e GONÇALVES, 2011).

Além disso, as edificações chegam a consumir, a nível mundial, de 12 a 16% do fornecimento de água potável; utilizar 40% de combustíveis fósseis; e contribuir com a geração de 40% de resíduos sólidos (RODE, BURDETT e GONÇALVES, 2011; WINES, 2000). Este setor também responde como o principal agente das mudanças climáticas, visto que a fase de uso de um edifício emite, sozinha, de 30 a 50% da contribuição global de gases do efeito estufa (CIWMB 2000; RAYNSFORD, 1999; UNEP, 2014).

Com a finalidade de minimizar essa problemática iniciou-se a concepção das edificações sustentáveis, as quais preveem uma performance ambiental eficiente e a mínima alteração possível do ambiente no qual estão inseridas. Para difundir, comprovar e cobrar essa sustentabilidade dos empreendimentos, foram criadas as certificações ambientais, cujos procedimentos direcionam ações para que estes alcancem um alto desempenho ambiental. Desta forma, avalia-se o perfil ambiental do edifício, em função do grau de atendimento à pré-requisitos especificados e ponderados, em cada processo (LEITE, 2011).

No Brasil, atualmente, não existe um sistema de certificação legítimo, motivo pelo qual processos internacionais têm sido importados e aplicados no país, os dois mais utilizados são, segundo Leite (2011), o LEED e o AQUA (dos Estados Unidos e da França, respectivamente).

Contudo, essas certificações podem não ser suficientemente aptas para julgar a “verdadeira” sustentabilidade de uma edificação brasileira. Isso se justifica porque, segundo Silva, Silva e Agopyan (2003), não é adequado copiar ou simplesmente aplicar uma certificação estrangeira, devido às grandes diferenças regionais que acompanham a concepção do processo certificador. Além disso, para conhecer o verdadeiro desempenho ambiental dos edifícios há que se analisar os sistemas e as atividades desenvolvidas durante todo o seu ciclo de vida, e não apenas de alguns requisitos específicos do processo certificador.

O conceito de ciclo de vida amplia a visão sobre os impactos causados pelos empreendimentos, permitindo analisar os efeitos (e potenciais impactos) na sua totalidade, o que muitas vezes vem fragmentado nos métodos de certificação.

É contextualizado neste cenário, que a metodologia de avaliação de impacto ambiental, denominada Análise do Ciclo de Vida (ACV), vem sendo uma prática estimulada no setor da construção civil. A ACV é uma metodologia estruturada e padronizada internacionalmente que permite avaliar as implicações ambientais de um produto, processo ou atividade, através da identificação e quantificação de energia e matéria, consideradas desde a extração de matérias-primas que entram no sistema até sua disposição final (ABNT, 2009a; GUINÉE, 2002).

Desta forma, os aspectos ambientais podem ser mapeados, indicando pontos fortes e fracos do produto. Essa característica da metodologia torna a ACV uma ferramenta poderosa de apoio a decisões dos envolvidos (empreendedores, projetistas, sociedade e poder público) que buscam evitar impactos prejudiciais ao meio, promover a eficiência dos sistemas e otimização dos processos de construção e operação das edificações (CHEHEBE, 2002; CURRAN, 1996; DE HAES et. al., 1996).

Pelas razões expostas acima, o presente estudo adotou a metodologia de ACV para analisar e quantificar a contribuição dos impactos ambientais de um edifício comercial com características sustentáveis durante a fase de uso, que, segundo Sartori e Hestnes (2007) e Khasreen, Banfill e Menzies (2009), é caracterizada por concentrar os impactos mais prejudiciais ao meio. Indicou-se, também, oportunidades de melhorias ambientais através da verificação dos pontos críticos do sistema, que podem até favorecer uma recertificação de maior qualidade (maior pontuação).

A importância do desenvolvimento desta pesquisa justifica-se pela atual relevância internacional da ACV como metodologia de avaliação de impactos em edificações. A interpretação dos resultados da

análise podem mitigar gargalos ambientais e trazer o desenvolvimento sustentável de um plano subjetivo para um nível mais efetivo e realista, tornando possível o empreendimento voltar-se para alternativas, cada vez mais, ambientalmente adequadas.

O presente trabalho foi realizado no decorrer do segundo semestre de 2015 e contou com o suporte e orientação do Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida (CICLOG) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e de uma organização proprietária e administradora de um edifício comercial de selo prata LEED v3.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste estudo é quantificar e analisar os impactos ambientais da fase de operação de um edifício comercial com características sustentáveis.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos, que têm o intuito de possibilitar o cumprimento do objetivo geral, são:

- Inventariar a fase de operação de um edifício comercial sustentável (detentor de certificação LEED).
- Identificar os gargalos do sistema de produto, ou seja, atividades concentradoras de impactos ambientais negativos.
- Analisar cenários de melhorias ambientais que reduziriam os impactos mais significantes do edifício e relacioná-los às exigências de uma recertificação pelo processo LEED.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA: CONCEITOS E ETAPAS DE UMA ACV.

A ACV é uma das metodologias mais reconhecidas e aceitas internacionalmente para avaliar os aspectos e impactos ambientais decorrentes do ciclo de vida de uma atividade, produto ou processo, conforme conceituado originalmente pela SETAC (1991). Essa avaliação é feita através da identificação e quantificação de entradas e saídas de fluxos do sistema (energia, matéria-prima, resíduos, emissões, entre outros), compreendendo etapas desde a extração de matérias-primas até a disposição final (CHEHEBE, 2002).

Em outras palavras, a ACV é um procedimento que analisa a complexa interação de um sistema com o ambiente ao longo do seu ciclo de vida, partindo da premissa que os estágios do ciclo geram impactos ambientais (SILVA, 2003). A Figura 1 exemplifica o ciclo de vida típico de um produto.

Figura 1 - Ciclo de vida de um produto.



Fonte: Sousa (2008).

Na ACV, os aspectos ambientais podem ser mapeados, tornando este um dos principais objetivos de se aplicar essa ferramenta, pois pode apontar pontos críticos do sistema, correspondendo àqueles com alto fator de degradação ambiental. Desta forma, torna-se possível identificar oportunidades para melhorias no perfil ambiental do produto, com a finalidade de reduzir ou evitar os impactos negativos (DANIELS e

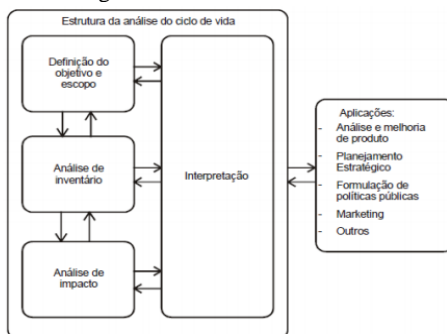


MOORE, 2002; SEO e KULAY, 2006). Outros objetivos considerados importantes em uma ACV são, conforme listado pela SETAC (1991): reproduzir, da forma mais realística possível, as interações entre o objeto de análise e o ambiente; e contribuir para o entendimento, tanto independente quanto global, das consequências das atividades humanas sobre o meio ambiente.

Usualmente, a ACV é utilizada para comparar alternativas tecnológicas entre produtos diferentes, destinados a uma mesma função, ou para avaliar o desempenho de uma determinada tecnologia, atividade ou produto (GUINÉE, DE HAES e HUPPES, 1993). São diversas as suas aplicações, tais como: otimização de processos, design de produtos mais sustentáveis, atendimento à legislação, marketing, auxílio na tomada de decisão em organizações, fornecimento de indicadores de eficiência ambiental e possibilidade de certificação ambiental (JENSEN, 1997; UNEP, 1996).

A ACV é hoje normalizada por um conjunto de normas da série ISO 14000, que estabelecem métodos e critérios para a condução dos estudos. No Brasil, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) estabelece os princípios gerais e divide a ACV em quatro fases bem definidas: a) definição do objetivo e escopo; b) análise de inventário (c) análise de impacto; d) interpretação de resultados. A metodologia deste estudo seguirá as diretrizes desta norma, conforme representado pela Figura 2.

Figura 2 - Estrutura de uma ACV.



Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a).

### 2.1.1 Definição de Objetivo e Escopo

Seguindo a estrutura metodológica proposta, a norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) enuncia que a meta de uma ACV deve ser

definida de forma clara e consistente com a aplicação pretendida, expondo as razões para realizá-la, bem como o público-alvo a que os resultados se destinam.

No escopo descreve-se o sistema de produto, cujas fronteiras e limitações devem ser estabelecidas e descritas antes de iniciar a avaliação (ASSIES, 1992). É necessário especificar o conjunto de processos elementares do ciclo de vida e as medidas assumidas pelo estudo como, por exemplo, os aspectos tecnológicos, geográficos e temporais necessários para garantir que a análise do sistema atinja o objetivo proposto (GUINÉE, DE HAES e HUPPES, 1993; SETAC, 1993; SHEN, 1995).

Além disso, segundo Ferrão (1998), aconselha-se, ainda, incluir nessa etapa: hipóteses do estudo, dados necessários para caracterização do sistema e a qualidade dos mesmos, procedimentos de alocação, tipo de avaliação de impacto que será utilizada, forma de revisão crítica e estrutura do relatório final.

Como os resultados esperados de uma ACV são em termos de comparação de desempenho ambiental, é necessário definir, nesta etapa, uma unidade funcional, de modo que as entradas e saídas possam se relacionar e a análise possa ser comparada, em uma referência compatível, a outras atividades do mesmo produto ou a outros produtos de mesma função (TAVARES, 2006; TOSTA, 2004).

### **2.1.2 Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

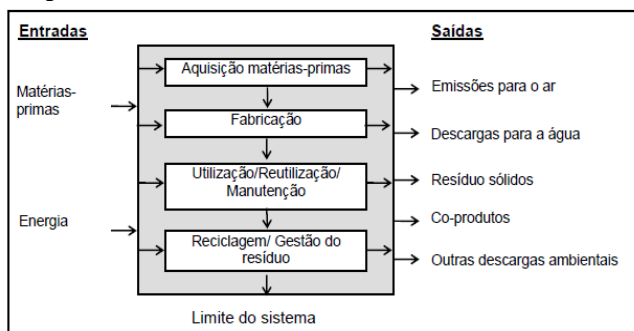
O inventário, de acordo com Valt (2004), refere-se à coleta de dados com a finalidade de quantificar os elementos de entrada e saída, através do balanço de massa e energia do sistema. Uma das principais limitações de um inventário, geralmente, é a utilização de dados de qualidade (GUINÉE, DE HAES e HUPPES, 1993; SETAC, 1991), ou seja, dados representativos do sistema de produto avaliado. Os dados podem ser de origem primária, coletados *in loco* do objeto de estudo; ou secundária, retirados da literatura ou de bases de dados.

Rode, Burdett e Gonçalves (2011) afirmam que a única forma realística de avaliar a performance de um edifício é medindo seu consumo durante o período de ocupação, ou seja, com dados primários. UNEP e SETAC (2009) também destacam a importância de inventariar com dados obtidos especificamente do estudo de caso para realizar uma ACV mais precisa.

A melhor forma de representar os componentes de um sistema no inventário é, de acordo com SETAC (1993), desenvolver um

fluxograma do processo representando as interligações entre os subsistemas. A determinação do fluxograma consiste em limitar o sistema de produto aos processos elementares que contribuem de forma mais relevante para o sistema de produto (DE HAES et al., 1996; GUINÉE e HEIJUNGS, 1995; HEIJUNGS et al., 1992). A Figura 3 ilustra um fluxograma típico de uma ACV, com suas respectivas entradas e saídas.

Figura 3 – Fluxos de entradas e saídas de um sistema na ACV.



Fonte: USEPA (2001) apud Ferreira (2004).

Após reunidos os dados, os valores obtidos são recalculados para a unidade funcional. Na sequência, os dados alimentam um modelo de caracterização, onde devem ser adequados a uma base de dados disponível, para determinar os aspectos ambientais do inventário em potenciais impactos (VIGON et al., 1993). Resumidamente, o inventário pode ser traduzido como ferramenta de análise quantitativa dos impactos ambientais (SOARES, SOUZA e PEREIRA, 2006).

### 2.1.3 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

A AICV é definida como sendo um processo quali-quantitativo de caracterização dos efeitos que as cargas ambientais resultantes da fase de inventário podem causar (SETAC, 1993). Segundo Fossati (2008), toda atividade realizada pelo homem tem impactos, enquanto que a problemática está em identificar se a magnitude e o risco deles estão em níveis aceitáveis, ou não, pela sociedade. Este contexto representa a importância da avaliação, pois ela permite conhecer o verdadeiro significado do impacto de certo sistema de produto, que pode ser benéfico ou adverso.

Conforme SAIC (2006), a avaliação fornece a estimativa dos impactos ambientais por etapa e/ou em totalidade do ciclo de vida de um produto, possibilitando comparar o desempenho de uma opção com outra. No entanto, não se limita a isso, mas permite também avaliar intercâmbios (*trade-off*) associados à modelagem de diferentes fluxos do sistema, em que determinado fator pode diminuir alguns impactos, e aumentar outros, por consequência (GMECV, 2001). Desta forma, pode-se criar diferentes cenários para verificar como certo fator pode influenciar no ciclo de vida do produto, a fim de indicar aquele mais adequado, ou seja, com características mais sustentáveis.

A avaliação facilita a interpretação do inventário, visto que torna os resultados brutos em compreensíveis categorias de impacto, tais como aquecimento global, depleção da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, entre outros (SETAC, 1993). A escolha das categorias de impactos avaliadas é definida conforme o objetivo da pesquisa.

A NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) dispõe que a avaliação de impacto deve conter, no mínimo, três etapas: seleção de categorias, classificação e caracterização. Na primeira etapa, seleciona-se a categoria a ser analisada, bem como os indicadores correspondentes. A segunda etapa corresponde à classificação, na qual os dados do inventário são relacionados às categorias de impacto. Na terceira, caracterização, os dados são multiplicados por um fator de caracterização, resultando em indicadores específicos de cada categoria (PRADO e KASKANTZIS NETO, 2011).

#### **2.1.4 Interpretação dos Resultados**

A interpretação visa responder às questões colocadas no objetivo do estudo em forma de resultados consistentes e completos. Tavares (2006) considera que, na etapa de interpretação, identificam-se as contribuições de impacto significativas, as quais permitirão propor recomendações para minimiza-los. Além de fornecer as possibilidades de melhorias ambientais, nesta etapa consideram-se também possibilidades de revisão da metodologia, de coleta de dados e/ou dos critérios de análise, devido às limitações e incertezas enfrentadas (estabelecidas na etapa de definição de objetivo e escopo).

Os resultados de um impacto podem ser interpretados em relação à magnitude destes, comparando-se com outros estudos semelhantes ou, ainda, simulando diferentes cenários através da alteração de variáveis de entrada (BLOM, 2010).

## 2.2 EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS E CERTIFICAÇÕES AMBIENTAIS

Edificações sustentáveis são aquelas que cumprem certos requisitos de desempenho e eficiência ambiental e causam mínimo impacto sobre o ambiente e a saúde humana (BURNETT, 2004). Uma edificação projetada e operada com sustentabilidade visa manter a harmonia entre o ambiente natural e o construído, ao conceber empreendimentos fundamentados na equidade dos aspectos ambientais, sociais e econômicos (CIB, 2000; EPA, 1996).

Degani e Cardoso (2002) e Bragança, Mateus e Koukkari (2007) relatam os diversos benefícios que o enfoque da sustentabilidade em edifícios traz ao meio ambiente, cujas medidas devem ser consideradas desde o momento de decisões preventivas de projeto, com escolhas otimizadas de design (iluminação, ventilação e conforto térmico mais naturais possíveis) e materiais ecoeficientes, passando pela economia de água, eficiência energética (principalmente devido ao condicionamento de ar) e otimização da locomoção dos funcionários durante a fase de uso, até a destinação ambientalmente adequada de resíduos. Sendo assim, John, Clements-Croome e Jeronimidis (2005) afirmam que para uma edificação ser chamada de sustentável ela deve garantir a qualidade ambiental em todo o ciclo de vida do edifício. De acordo com Ferreira (2010), os princípios da construção sustentável são os expostos na Figura 4.

Figura 4 – Princípios de sustentabilidade em edificações.



Vários países têm desenvolvido regulamentações e incentivos para que edificações sejam projetadas de forma ambientalmente adequada. Em 2005, por exemplo, o Comitê Europeu de Normalização começou uma iniciativa chamada “*Sustainability of Construction Works*” (CEN/TC 350, 2015) com o objetivo de desenvolver normas e métodos padronizados para avaliar e comparar os aspectos de sustentabilidade empregados em edifícios novos e existentes (BRAGANÇA e MATEUS, 2012). Atualmente, porém, na falta de uma padronização mundial, muitos países criaram sistemas próprios de certificação (ou etiquetagem) ambiental, os quais avaliam a edificação segundo indicadores considerados mais adequados para a realidade daquela região (LAMBERTS et al., 2008).

No Brasil, existe uma iniciativa coordenada pelo INMETRO chamada de Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que fornece etiquetagem voluntária de eficiência e conservação energética em edificações<sup>1</sup>, através do selo PROCEL com diferentes níveis - do mais eficiente A até o menos eficiente E. Em 2014, foi lançada a instrução normativa MPOG/SLTI N°2 que dispõe sobre a obrigatoriedade desta etiquetagem, com selo nível A, nos projetos de edificações públicas (BRASIL, 2014), e deve se tornar obrigatória para todas as edificações nos próximos anos. Apesar disso, esta iniciativa tem foco apenas na questão energética, sem considerar os demais aspectos ambientais.

O Brasil, atualmente, carece de um sistema de certificação ambiental próprio e completo. Devido a isso, alguns processos têm sido importados e aplicados no país como, por exemplo, o AQUA (Alta Qualidade Ambiental), adaptação brasileira da certificação francesa ‘*démarche HQE*’, considerada a certificação mais coerente para o contexto do país (BUENO, 2010).

Entretanto, desde 2007, o GBCB - *Green Building Council Brasil*, filiado ao WGBC - *World Green Building Council* adotou como selo oficial de certificação sustentável brasileira o modelo americano LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design* - sigla em inglês para Liderança em Energia e Design Ambiental), que é o certificado mais valorizado internacionalmente para orientação e mensuração das características sustentáveis de edificações e, por isso, o

---

<sup>1</sup> BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. Regulamentação para Etiquetagem de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. aprovada em outubro de 2007 pelo Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE).

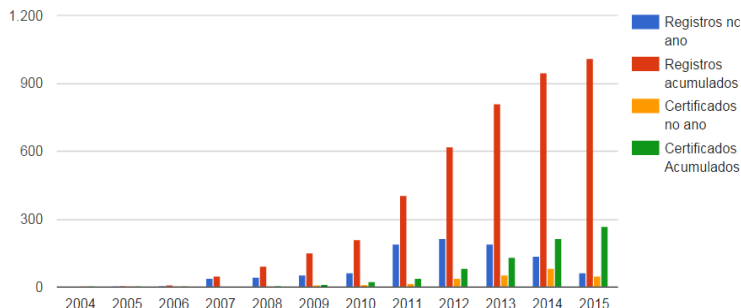
mais utilizado atualmente nos empreendimentos do Brasil (DEEKE, CASAGRANDE JR e SILVA, 2010; FONSECA, 2014).

A certificação LEED está transitando da terceira versão (v3) para a quarta versão (v4), sendo que ambas podem ser aplicadas atualmente. O LEED possui sete categorias a serem consideradas: espaço sustentável, uso eficiente de água, energia e atmosfera, materiais e recursos, qualidade ambiental interna, inovação tecnológica no projeto e créditos de prioridade regional. O atendimento aos pré-requisitos destas categorias garante pontos ao empreendimento, cujo somatório determina um nível de certificação. A pontuação define o grau de proteção ambiental do empreendimento e pode variar de no mínimo 40 pontos, que apenas certifica o edifício, até 110 pontos, que atribui selo Platina, passando por selos de nível Prata e Ouro (OWENS et al., 2013).

A ACV é um dos requisitos da última versão LEED v4, que pode somar pontos ao provar uma redução de impactos. As características sustentáveis adotadas devem ter uma redução de, no mínimo, 10% quando comparado ao projeto convencional (ou cenário base) em pelo menos 3 das 6 categorias de impacto (Aquecimento Global, Acidificação, Eutrofização, Depleção da Camada de Ozônio, Formação de Compostos Oxidantes e Depleção de Energia Não-renovável) e nenhuma categoria pode aumentar mais que 5% (USGBC, 2015). Acredita-se que nas próximas versões este requisito, por hora opcional, se tornará obrigatório para conseguir a certificação.

Atualmente, o Brasil possui 268 prédios certificados e 1009 registrados no processo de certificação (GBCB, 2015). A Figura 5 ilustra a evolução da procura pela certificação LEED no país, que vem apresentando crescimento significativo com o passar dos anos.

Figura 5 - Evolução de registros e certificações LEED no Brasil.



Fonte: GBCB (2015).

Essa crescente procura pela certificação LEED é justificada pela grande vantagem competitiva no mercado que ela oferece. Cada vez mais exige-se o emprego da sustentabilidade, inclusive de forma condicional para financiamentos. Desse modo, a maioria das certificações tem sido atribuídas a edifícios do tipo comercial, devido aos benefícios gerados tanto para os proprietários e responsáveis, que buscam marketing, quanto para os ocupantes, pela melhoria da produtividade e da qualidade no espaço interior (UNEP, 2014).

Um estudo feito pelo WGBC, em prédios certificados ao redor do mundo, mostra que estes podem economizar 30% de energia, até 50% de água, liberar 35% a menos de CO<sub>2</sub> e evitar 60% de geração de resíduos sólidos descartáveis (GBCB, 2015)

## 2.3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA APLICADA PARA EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS

Levine et al. (2007) descrevem que a indústria da construção representa uma das atividades com maior impacto sobre o meio ambiente, pois suas fases consomem recursos e energia e geram resíduos em proporções que superam a maioria das outras atividades econômicas. A rápida urbanização e desenvolvimento dos países emergentes, caso do Brasil, também apontam para o crescimento exponencial de novos edifícios, tendendo a agravar ainda mais essa situação.

Devido a isso, há grandes exigências no cenário competitivo de mercado e uma crescente pressão na criação de políticas direcionadas para as edificações. Nesse âmbito, os envolvidos e tomadores de decisões têm optado por medidas sustentáveis em seus empreendimentos, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais, diminuir custos, adequar-se as novas legislações e trazer uma imagem positiva para o seu negócio.

No entanto, a verdadeira “sustentabilidade” dessas ações é muitas vezes desconhecida. Segundo Curwell et al. (1999), algumas especificações estimadas em projeto podem apresentar, depois de algum tempo, valores de indicadores superestimados e mais otimistas dos que existem na prática. Alguns autores afirmam que os edifícios certificados LEED consomem, na realidade, a mesma quantidade de energia que edifícios convencionais, correspondendo até 150% a mais do especificado em projeto (OLIVEIRA, 2014; SCOFIELD, 2013).

Neste contexto, a ACV vem ganhando grande relevância como ferramenta de avaliação de impactos ambientais, nos últimos 15 anos (CABEZA et al. 2014). Essa metodologia tem sido aplicada para avaliar



se as especificações de design e projeto iniciais do edifício não sofreram divergências para aquele realmente construído e operado (BRAGANÇA e MATEUS, 2012).

A ACV, dentre as metodologias existentes de avaliação de impactos em edifícios, é considerada – atualmente – como a única base legítima de comparação entre materiais, tecnologias e atividades no Brasil (ARAÚJO, 2008). Silva, Silva e Agopyan (2003) também firmam a existência de um consenso acadêmico que a avaliação de edifícios no Brasil deve se aproximar ao máximo dos conceitos de ACV.

A razão disso é que, apesar da existência de diversos modelos internacionais de avaliação ambiental de edifícios, um modelo estrangeiro não é adequado e não deve ser replicado para o contexto brasileiro, pois há grandes disparidades entre as regiões causadas pelas condições específicas de cada lugar (SILVA, 2003). Diante da inexistência de metodologias nacionais consolidadas, a ACV é considerada a ferramenta mais correta para avaliar o perfil ambiental das edificações brasileiras.

A mesma autora conclui que aplicar ACV em edificações certificadas sustentáveis é mais fácil que em edificações convencionais. Isso se justifica, primeiramente, pelo fato de que se responsáveis se preocuparam em obter uma certificação, os mesmos estariam mais próximos de um perfil interessado em avaliar o edifício por essa metodologia, na possibilidade de demonstrar sua redução de impactos. Esses resultados, além de demonstrarem vantagens que fazem diferença no mercado, tendem a encorajar os interessados a adotar outras melhorias de desempenho no edifício para conseguir uma recertificação mais exigente e de maior qualidade, ao provar a mitigação de impactos negativos através de cenários simulados na análise.

Adicionalmente, a condução da ACV requer a disponibilização de uma grande quantidade de informações sobre as atividades e produtos do edifício que tendem a ser facilitadas por procedimentos de documentação e arquivamento que acompanharam a implementação da certificação. Diversas vantagens oferecidas pela aplicação da ACV em edifícios foram reunidas por Silva (2003) e estão apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Aplicações e vantagens da ACV em edificações.

Aplicações da avaliação de edifícios (SILVA, 2000)	Vantagens oferecidas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instrumentos para divulgação mercadológica</li> <li>• Suporte à introdução de sistemas de gestão ambiental</li> <li>• Especificação do desempenho ambiental de edifícios</li> <li>• Auxílio a projeto</li> <li>• Estabelecimento de normas de desempenho ambiental</li> <li>• Auditorias ambientais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria da imagem/reconhecimento pelo mercado de empresas e profissionais que adotam práticas de projeto e construção mais sustentáveis</li> <li>• Aquecimento do mercado para edifícios e produtos de construção com maior desempenho ambiental</li> <li>• Embasamento da definição e o entendimento do que é um edifício sustentável</li> <li>• Acesso facilitado a financiamentos, acesso a novos mercados ou fortalecimento do nicho atual, perspectiva de negócios no longo prazo</li> <li>• Redução de custos no longo prazo (uso de recursos financeiros e naturais) e maior lucratividade, qualidade do ambiente interno e satisfação dos clientes, redução de riscos (inclusive financeiros);</li> <li>• Estimulo para elevação do nível de desempenho de edifícios novos e existentes</li> <li>• Conhecimento do estado atual dos impactos de edifícios e atividades, para identificação de oportunidades e definir metas para melhoria</li> </ul>

Fonte: Silva (2003).

### 2.3.1 Estado da arte de estudos de ACV para edifícios

Primeiramente, é importante fazer algumas distinções entre os tipos de edifícios. Existem, normalmente, duas funções atribuídas aos edifícios na ACV: os com fins residenciais, de moradia, e os comerciais, de uso coletivo, com considerável relevância aos com finalidade de escritório (SHARMA et al., 2011). Há diferença também entre edifícios sustentáveis, definidos anteriormente, e edifícios convencionais, que são aqueles construídos de acordo com as práticas comuns do país.

A ACV pode avaliar o ciclo de vida completo, quando são contempladas todas as etapas de um sistema de produto, ou parcial, quando considera apenas uma etapa isolada. O ciclo de vida do produto edifício contempla três grandes etapas (DEGANI e CARDOSO, 2002):

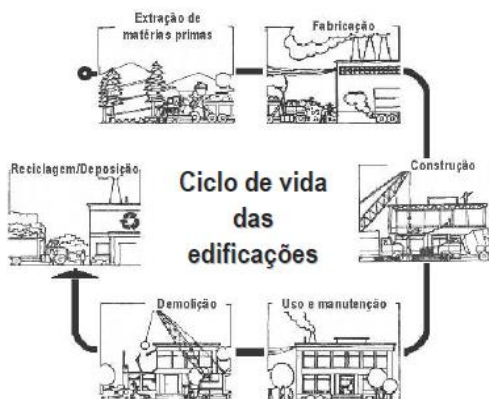
**PRÉ- OPERACIONAL:** engloba o planejamento e a construção. O planejamento refere-se à concepção inicial do produto, considerando o projeto, design e especificações construtivas. A construção considera as extrações de matérias primas, fabricação de materiais, bem como o transporte destes e a elevação da estrutura no local;

**OPERACIONAL:** é a fase de uso do empreendimento, etapa em que o mesmo é ocupado por usuários. Nessa fase ocorrem atividades cotidianas, como o consumo de água e energia (iluminação, aparelhos

elétricos e climatização) geração de efluentes e resíduos, transporte de funcionários e manutenções. Essa etapa pode considerar também reformas, com o objetivo de modernizar o empreendimento ou de repor os componentes que atingiram o final de sua vida útil (janelas, portas, móveis, etc.).

**PÓS- OPERACIONAL:** é a fase de inutilização e desmonte do produto edifício que engloba o processo de demolição, transporte e a destinação final de resíduos sólidos.

A Figura 7 representa a sequência das fases do ciclo de vida de uma edificação.



Fonte: Tavares (2006).

Existe grande dificuldade em inventariar com dados concretos as fases de um edifício, que não a de operação, devido à limitada informação padronizada e disponível sobre os processos de demolição e construção (RAMESH, PRAKASH e SHUKLA, 2010). No que se refere à demolição, os valores de geração e destinação dos resíduos e o método usado para desconstruir pertencem a um futuro incerto e podem ser apenas estimados, geralmente. Na etapa de construção, a maior dificuldade está em obter dados dos materiais de construção, devido a sua enorme variedade e composição (SOARES, SOUZA e PEREIRA, 2006).

A fase de uso de um edifício possui longo período de vida útil, portanto, diversos autores sugerem que para reduzir os impactos ambientais é mais efetivo mudar a forma como os edifícios são

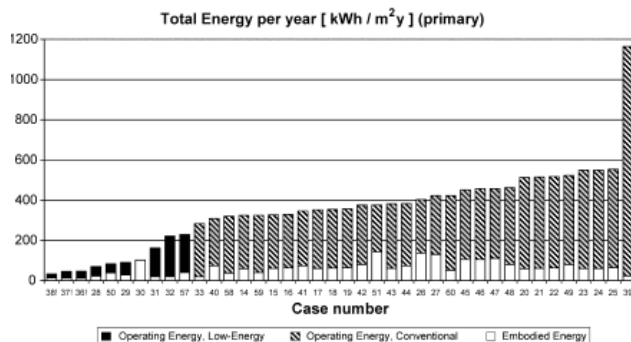
utilizados e geridos, em vez de mudar as características de construção e desconstrução (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA 2000; ITARD e KLUNDER, 2007; TRELOAR et al., 2000).

A fase operacional é caracterizada por concentrar os maiores impactos negativos, podendo representar de 62 a 98% do total de impactos do ciclo de vida (KHASREEN, BANFILL e MENZIES, 2009; SILVA, 2012). Segundo Citherlet (2001) o impacto ambiental total resultante de um edifício pode ser considerado com a mesma ordem de grandeza e magnitude daquele gerado apenas pela fase de uso.

Alguns estudos possuem uma derivação da ACV em que todas as entradas de energia são mensuradas, chamada de Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE). A ACVE contempla a energia embutida (relativa à construção e seus materiais), operacional e de demolição. O maior consumo do ciclo de vida energético de um edifício está relacionado à energia operacional, considerada a principal agente de degradação ambiental (BLENGINI e DI CARLO, 2010).

Ramesh, Prakash e Shukla (2010), em uma revisão de 73 estudos de caso de ACVE aplicados em 13 diferentes países, afirmam que a fase operacional é a mais significativa, pois demanda de 80 a 90% da energia no ciclo de vida um edifício. Sartori e Hestnes (2007) também organizaram diversos dados relativos a 60 estudos de ACVE espalhados pelo mundo e encontraram que a energia operacional é dominante em todos os casos e mesmo edificações com características de alta eficiência energética demandam no mínimo 54% do total de energia (Figura 8). Por conseguinte, é nessa fase que devem ser aplicados esforços para atingir metas de otimização energética.

Figura 8 – Energia total, operacional e embutida em edificações convencionais e de alta eficiência em diversos estudos de caso.



Fonte: Sartoti e Hestnes (2007).

Os autores também relatam que o consumo da energia operacional de edifícios comerciais é superior aos residenciais. A justificativa é que há uma maior densidade de ocupação, havendo mais consumo por  $m^2$ , e uma maior demanda energética para manter condições de conforto térmico, com uso de ar condicionados e ventilação, e manter a iluminação e diversos aparelhos eletrônicos como: computadores, impressoras, máquinas, servidores, etc. Esses consumos ocorrem durante todo o período de funcionamento do empreendimento, ou seja, grande parte ativa do dia-a-dia (normalmente de 8 a 10 horas diárias, por um período que pode variar de 20 a 80 anos).

Na Tabela 1 foram reunidas informações relevantes de estudos de caso presentes na literatura que analisaram o ciclo de vida de edificações com função comercial, que é o foco deste estudo.

Tabela 1 - Estado da arte da ACV para edificações comerciais.

Referência Bibliográfica	Unidade Funcional	Vida Útil (anos)	Localização	Área ( $m^2$ )	ACV/ ACVE	Fase do ciclo
Arena and Rosa (2003)	Um ambiente (sala)	50	Argentina	-	ACV	Construção e operação
Arpke e Hutzler (2005)	$m^3$	25	Estados Unidos	7700	ACV	Operação
Buchanan e Honey (1994)	$GJ/m^2$	25	Nova Zelândia	2400 e 8568	ACV	Construção
Citherlet e Hand (2002)	$m^2/ano$	80	Suíça	5.900	ACV	Completo
Cole e Kernan (1996)	$GJ/m^2/ano$	50	Canadá	4.620	ACVE	Completo
Dimoudi e Tompa (2008)	$m^2/ano$	50	Grécia	1891 e 400	ACV	Construção
Ding (2004)	$m^2$	40	Austrália	832-1680	ACV	Completo
Junnila, Horvath e Guggemos (2006)	$m^2/ano$	50	Estados Unidos	4.400	ACV	Completo
Junnila (2004)	$m^2/ano$	50	Finlândia	2.400	ACV	Completo
Junnila e Horvath (2003)	$m^2//ano$	50	Finlândia	15.600	ACV	Completo
Junnila (2003)	$m^2/ano$	50	Finlândia	4.400	ACV	Completo
Kofoworola e Gheewala (2009)	$60.000 m^2$	50	Tailândia	60.000	Ambos	Completo
Li (2006)	$m^2/ano$	35	Japão	9.000	ACV	Completo
Pullen (2000)	$GJ/m^2/ano$	60	Austrália	28.400	ACVE	Construção e operação

Referência Bibliográfica	Unidade Funcional	Vida Útil (anos)	Localização	Área (m <sup>2</sup> )	ACV/ ACVE	Fase do ciclo
Scheuer, Keoleian e Reppe (2003)	m <sup>2</sup>	75	Estados Unidos	7.300	ACVE	Completo
Stein, Serber e Hannon (1976)	btu/pés <sup>2</sup>	20	Estados Unidos	-	ACV	Construção
Suzuki e Oka (1998)	m <sup>2</sup>	40	Japão	1502 - 216 000	ACVE	Completo
Treloar et al. 2001	m <sup>2</sup> /ano	40	Austrália	47.000	ACVE	Construção e operação
Trusty e Meil (2000)	m <sup>2</sup> /ano	-	Canadá	21.740	ACV	Construção e operação
Wu et al. (2011)	m <sup>2</sup> /ano	50	China	36.500	ACVE	Completo
Xing, Xu e Jun (2008)	m <sup>2</sup>	50	China	34620 e 46240	Ambos	Completo
Yohanis e Norton (2002)	m <sup>2</sup>	30 e 60	Irlanda	6.175	ACVE	Construção
Zhang et al. (2006)	yuan/m <sup>2</sup>	50	China	35 685	ACV	Construção e operação

Cabeza et al. (2014), em sua revisão de diversos estudos de ACV para edificações, concluíram que a maioria dos estudos de caso apresentam certas características sustentáveis, principalmente de eficiência energética. Nos estudos listados pode-se verificar a importância atribuída à análise do impacto de energia (ACVE), motivada pela pressão atual de reduzir sua demanda.

Segundo a Tabela 1, as unidades funcionais variaram um pouco, mas um padrão de escolha foi mantido, utilizando m<sup>2</sup>/ano. Como a maioria dos estudos contemplou todas as etapas do ciclo de vida, considerou-se um período de vida útil de operação do edifício. Esses períodos, de 20 a 80 anos, multiplicaram os valores anuais, sendo que a idade mais adotada é 50 anos, seguindo a indicativa do Comitê Europeu (EUROPEAN COMMISSION, 1997).

Há algumas dificuldades em realizar uma ACV em edifícios, que foram relatadas nesses e em outros estudos. Primeiramente, como os edifícios têm longos períodos de vida útil, torna-se difícil prever todo seu ciclo de vida, pois ele pode sofrer diversas transformações (KHASREEN, BANFILL e MENZIES, 2009). Devido a sua heterogeneidade, os resultados da ACV de um edifício não podem ser generalizados para os demais, como acontece com outros produtos, pois cada edifício é único e possui características, atividades e materiais específicos. (KOTAJI, SCHUURMANS e EDWARDS, 2003).

Outra limitação aparece ao se comparar os estudos, pois as simplificações e considerações não são adotadas da mesma maneira, nem são analisados os mesmos indicadores, dificultando a interpretação dos resultados pela falta de uma padronização mínima (SARTORI e HESTNES, 2007). Além disso, a comparação de edifícios em países diferentes pode se tornar complexa, pois mudam-se as condições geográficas, climáticas e culturais.

Segundo Ortiz, Castells e Sonnemann (2009), uma das principais características que pode causar a incompatibilidade de comparação dos estudos existentes com o cenário brasileiro é que a maioria foi aplicada em regiões desenvolvidas e frias, resultando em grandes disparidades como, por exemplo, o alto consumo de energia operacional resultante do aquecimento (calefação) dentro dos edifícios, fato que não se aplica a demais regiões tropicais e ao Brasil. Essa informação foi corroborada pela revisão apresentada na Tabela 1.

Nesse sentido, este estudo de caso entra para somar ao estado da arte, sendo o primeiro de ACV em edificações comerciais, a nível nacional. Seus resultados fornecerão indicadores para comparações mais realistas com casos brasileiros e, dessa forma, auxiliarão na minimização dos pontos de incertezas e dificuldades relatadas.

### **3 METODOLOGIA**

A estruturação e o procedimento de execução deste estudo foi dividida e seguiu, cronologicamente, as etapas principais da metodologia, conforme as orientações referenciadas e a norma vigente NBR ISO 14040 e 14044.

#### **3.1 OBJETIVO E ESCOPO**

O objetivo do estudo é analisar os impactos ambientais que um edifício comercial sustentável causa sobre o meio durante sua etapa operacional.

Os resultados da avaliação de impactos do edifício permitirão identificar gargalos do sistema, que deverão ser reportados aos responsáveis pelas tomadas de decisão do empreendimento juntamente com sugestões de possíveis melhorias ambientais para reduzi-los.

Serão modelados diferentes cenários, onde algumas das medidas mitigadoras propostas para os gargalos serão simuladas. As informações relativas à performance destes cenários deverão mostrar aos interessados do setor de construção a capacidade de redução de impactos quando

medidas mitigadoras são implementadas, visando também cumprir requisitos para uma recertificação LEED mais valorizada.

### **3.1.1 Escolha e caracterização do produto edifício comercial sustentável**

Seguindo as recomendações de Silva (2003) sobre as vantagens de se realizar a ACV em edifícios sustentáveis, a escolha do objeto de estudo de caso recaiu sobre um edifício comercial cuja sustentabilidade fosse reconhecida pela certificação ambiental.

Adotou-se a certificação americana LEED como eixo norteador na escolha do edifício sustentável, por ser o certificado de construções sustentáveis mais aceito no Brasil e no mundo, atualmente (GBCB, 2015). No estado de Santa Catarina, segundo dados fornecidos pelo site do *Green Building Information Gateway* (GBIG, 2015), existem cinco edifícios certificados LEED, todos com função comercial. Apenas um desses edifícios está localizado em Florianópolis.

Por isso, a tipologia comercial foi escolhida como objeto de estudo. Além do mais, conforme descrito anteriormente, os padrões de uso (número de ocupantes, atividades desenvolvidas, tempo de ocupação diária, etc.) desse tipo de edifício demandam um consumo energético maior e, conseqüentemente, provocam impactos ambientais mais prejudiciais que os de função residencial. Portanto, o objeto selecionado para o estudo de caso foi o edifício localizado no centro empresarial Office Park (Bloco III), na SC 401 – Saco Grande, Florianópolis/SC (Figura 9).

Figura 9 – Edifício do Office Park, Florianópolis/SC.



Fonte: MOS arquitetos e associados (2015).



O edifício possui cinco andares, totalizando 9979 m<sup>2</sup> de área útil, onde trabalham 110 funcionários em horário convencional de comércio, das 8 às 18 horas – de segunda à sexta-feira. Entretanto, o horário de funcionamento do edifício é de 24 horas, incluindo o período noturno e finais de semana. Nos horários não-comerciais a quantidade de funcionários cai para 10% deste total, aproximadamente.

Segundo informações fornecidas pelo GBIG, em março de 2014 o prédio recebeu a certificação LEED for New Construction v3 (2009), no nível Prata, ou *silver* em inglês (Figura 10). O edifício recebeu uma pontuação 52 de 110, nota superior a 66% dos projetos dessa categoria, sendo grande parte desta pontuação atribuída à excelente qualidade do ambiente interno e alta eficiência no uso de água (GBIG, 2015).

Figura 10 – Certificação LEED nível prata do edifício.



Fonte: Documento fornecido pelos responsáveis pelo empreendimento.

Algumas das características que viabilizaram a certificação do empreendimento foram, segundo relatório fornecido pelo responsável, um moderno sistema de aproveitamento de água da chuva; torneiras com temporizador; redutor de vazão pela indução de ar junto à saída das torneiras; descarga com duplo fluxo de acionamento; incentivo de caronas e uso de veículos nível A - PROCEL (através do beneficiamento de vagas preferenciais); e uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) que trata 100% do efluente gerado pelo edifício no próprio condomínio, para não aumentar a pressão sobre o sistema público.

O edifício conta, ainda, com uma eficiência energética assegurada por sistemas de ar condicionado com *chillers* de última geração; insuflamento pelo piso elevado; controle local de temperatura e umidade; redução da iluminação das garagens em horários pré estabelecidos; implantação de rotina de desligamento de luminárias

pelos vigilantes no período noturno; indicação com adesivos dos interruptores que devem ou não ficar ligados durante o dia; implantação de procedimento para manter a iluminação mínima necessária para dias claros; sistemas de iluminação dimerizados e com lâmpadas de alto rendimento (LED); película refletiva nas claraboias do edifício que reduzem a incidência do sol e da temperatura.

### **3.1.2 Fronteiras do sistema**

Apenas a etapa operacional do ciclo de vida do edifício, ou seja, a fase de uso deste, será foco deste trabalho, devido ao fato de corresponder à fase com maior impacto negativo.

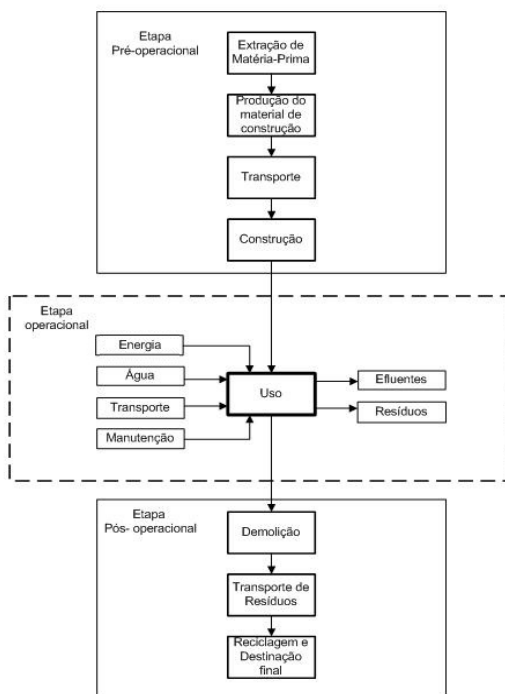
Tendo isso em vista, as principais atividades dessa fase foram selecionadas para avaliação. Utilizou-se como critério de escolha as atividades de alta frequência, cotidianas, cuja probabilidade de causar impactos significativos é maior. As atividades incluídas foram: consumo de energia e de água, geração de resíduos e de efluentes, transporte dos funcionários e uso de produtos de manutenção cotidianos.

No entanto, optou-se pela exclusão dos produtos de limpeza, também de uso cotidiano, porque seus impactos são considerados pouco significativos frente às demais atividades em termos de demanda de energia e emissão de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, eles podem ser suprimidos sem causar prejuízo aos resultados da análise, conforme a indicativa de simplificação para ACV de edificações feita por Bribián, Usón e Scarpellini (2009).

Grandes manutenções ou reformas, como troca de móveis, portas, janelas, substituição de estruturas e acabamentos, não foram consideradas neste trabalho devido a menor frequência de acontecimentos e a inviabilidade de incluir dados que não podem ser previstos ou quantificados com qualidade, visto que a reposição ou troca de materiais no edifício depende de fatores externos (condições climáticas de deterioração) e internos (adaptação a novas tecnologias ou sofisticação).

A Figura 11 ilustra o ciclo de vida do edifício analisado e destaca a fronteira do sistema ao delimitar, exclusivamente, as principais atividades da etapa operacional.

Figura 11 - Fronteira do sistema delimitada pelas principais atividades da etapa operacional.



### 3.1.3 Unidade Funcional

A fim de promover a equivalência entre diferentes sistemas, determina-se uma unidade funcional exercida durante certo período. (SOARES, SOUZA e PEREIRA, 2006). A unidade escolhida levou em consideração a possibilidade de comparar os resultados deste com outros estudos. Logo, adotou-se a unidade funcional mais utilizada na literatura para avaliar edificações, conforme a revisão de Khasreen, Banfill e Menzies (2009) e reforçada pelo item estado da arte deste trabalho.

Essa unidade é: metros quadrados de área útil no período de um ano:  $\text{m}^2/\text{ano}$  e permite comparar edifícios com diferentes tamanhos (áreas) e tempos de vida útil. Além de possibilitar a aplicação desta em análises de outras fases da edificação, como construção e demolição, caso venham a existir em trabalhos futuros.

### 3.2 INVENTÁRIO

A etapa de inventário contemplou a coleta de dados, incluindo a quantificação de todas as entradas e saídas significativas do sistema. Com o intuito de tornar os resultados mais corretos, ou seja, capazes de expressar a realidade da forma mais confiável possível, este estudo utilizou, majoritariamente, dados primários obtidos especificamente do estudo de caso selecionado.

Todavia, durante a modelagem de subprodutos, como os de manutenção, ou durante a conversão de unidades, como a transformação de volume para massa pelo fator de densidade, foi necessário recorrer a dados secundários. Esses dados foram obtidos de referências bibliográficas ou outros inventários comprovados cientificamente e devidamente documentados pelos autores que os obtiveram (resíduos sólidos e produtos de manutenção).

O processo de coleta de dados primários iniciou com uma visita técnica ao empreendimento, com o propósito de conhecer seus sistemas e investigar as atividades de maior relevância durante a operação.

Posteriormente, para facilitar e organizar a coleta de dados, foi feita uma listagem (*check-list*) de todas as informações necessárias para executar o inventário, a qual foi tabulada em planilha eletrônica e enviada aos responsáveis pela operação do edifício. Assim, o levantamento de dados direto nas fontes foi realizado exclusivamente pelos responsáveis (Engenheiro Civil e Gerente de Operações do edifício) e disponibilizado através das respostas desta planilha.

O período levantado foi de um ano, compreendido de agosto de 2014 a agosto de 2015, sendo que os valores foram levantados para cada mês individualmente e depois somados para completar um ano de operação. Estes valores foram divididos pela área total do empreendimento, a fim de obter todos os valores na unidade funcional ( $m^2/\text{ano}$ ). Os dados disponibilizados foram obtidos por meio de documentos de projetos, monitoramentos, registros de compras, medições disponíveis nos extratos de contas e por meio de estimativas dos responsáveis pela operação do edifício. A seguir será especificada a fonte dos valores para cada uma das atividades:

**ENERGIA:** A energia predominante é na forma de eletricidade que provém da matriz nacional e é utilizada para o condicionamento de ar, iluminação, aquecimento de água e aparelhos eletrônicos. Logo, os valores de consumo foram retirados dos extratos das contas emitidas pela concessionária de fornecimento de energia, a CELESC. Essa fonte

de dados, tem sido aplicada em diversos estudos de ACV em edificações (KOFOWOROLA e GHEEWALA, 2009; ADALBERTH 1997; WINISTORFER et al., 2005). Existe ainda outra forma de consumo de energia no prédio, por meio de geradores, apenas em casos de emergência quando há queda de energia da rede. Essa energia é gerada pela queima de óleo diesel e seu valor foi calculado pelo responsável através da verificação do consumo mensal de óleo.

**ÁGUA:** A água potável é fornecida pela rede pública e, da mesma forma que para a energia, os valores foram retirados dos extratos das contas emitidas pela concessionária de fornecimento, a CASAN. Existe também um sistema de captação de água da chuva, para uso na irrigação e nos vasos sanitários, cujo valor de consumo foi extraído do projeto de captação.

**TRANSPORTE:** Os tipos de meio de transporte utilizados pelos funcionários e a quantidade de funcionários que utilizam cada um deles foram estimados, pelo responsável, de acordo com a realidade do empreendimento.

**RESÍDUOS:** O volume de cada tipo de resíduo gerado: reciclável, tóxico e rejeito; foi estimado pelo responsável em função da quantidade e volume de containers de armazenamento cheios por dia.

**EFLUENTES:** A vazão de efluentes gerados por mês foi fornecida pela empresa responsável através do monitoramento da Estação de Tratamento de Efluente – ETE que existe no local.

**MANUTENÇÃO:** Os tipos de produtos utilizados na manutenção cotidiana, bem como sua quantidade utilizada por mês, foram obtidos através dos registros de compras do empreendimento, método também utilizado por Treloar et al. (2001).

### 3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Muitas ferramentas computacionais estão disponíveis para facilitar a condução dos estudos de ACV, auxiliando na compilação dos dados do inventário e, posteriormente, na avaliação de impactos. A ferramenta a que se recorreu nesta modelagem foi o Software Sima-Pro® (PRÉ CONSULTANTS, 2015).

Dessa forma, a modelagem resumiu-se em transferir os dados coletados para o Software, através de adaptações para os bancos de dados disponíveis. Durante a inserção da base de dados optou-se por dar preferência àquelas de origem nacional mas, devido à falta de *databases* brasileiras, recorreu-se, na maioria dos casos, à base de dados internacional, que possui mais informações disponíveis.

O banco de dados utilizado foi o ecoinvent 3.0 (FRISCHKNECHT et al., 2005), uma das fontes mais aceitas pelos pesquisadores de ACV, segundo Bragança e Mateus (2012). No entanto, houve duas exceções devido à inexistência de dados equivalentes no Ecoinvent. Foram os casos dos resíduos recicláveis e das lâmpadas. Na modelagem dos resíduos, o processo de reciclagem foi extraído do banco de dados Buwal 250 (BUWAL 250, 1998), evitando, desta forma, processos de alocação ou de produto evitado. Para manutenção de lâmpadas, utilizou-se um mix do uso de lâmpadas LED, vapor e fluorescente do banco de dados USA Input Output Database 98 (EIO-LCA. 2003; SUH, 2003).

Esta etapa necessitou, em alguns casos, conversões de valores para a unidade existente na base de dados escolhida. Os cálculos e pressupostos utilizados para adequar os dados ao modelo estão apresentados nos resultados da análise de inventário.

Nesta etapa, as informações contidas no inventário foram traduzidas em categorias de impacto ambiental, através de modelos de caracterização. A seleção das categorias levou em consideração dois fatores. Primeiro, verificaram-se as categorias mais analisadas e recomendadas na literatura. Na sequência, consultaram-se as exigidas pela certificação LEED v4. A certificação LEED requer que, ao menos três categorias, dentre seis listadas pelo USGBC, sejam analisadas sendo que uma delas tem que ser o aquecimento global (USGBC, 2015).

Logo, quatro categorias de impacto foram avaliadas neste estudo. Todas cumprem a exigência da certificação LEED e são as mesmas que Ortiz, Castells e Sonnemann, (2009) compilaram como as mais avaliadas nos estudos. Essas categorias são:

- Aquecimento Global (AG);
- Depleção da Camada de Ozônio (DCO);
- Acidificação (AC);
- Eutrofização (EU);

As categorias selecionadas também são as mais recomendadas pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN/TC 350, 2015), para estudos de ACV em edificações.

A classificação e a caracterização foram executadas pelo método TRACI (BARE, 2011), utilizado pela EPA (*Environmental Protection Agency's*) para avaliar as categorias no processo de certificação LEED (BARE, 2002). Na classificação, relacionaram-se diferentes tipos de

emissões, resultantes dos dados de inventário, a uma categoria de impacto. Posteriormente, na caracterização, essas emissões foram agrupadas à mesma categoria de impacto, através de fatores de caracterização, e expressas por um único indicador equivalente. Na Tabela 2 estão apresentadas as emissões, o indicador e a escala geográfica de cada categoria de impacto.

Tabela 2 – Indicadores, emissões e escala geográfica das categorias de impacto.

<b>Categorias de impacto</b>	<b>Sigla</b>	<b>Indicador equivalente</b>	<b>Escala geográfica</b>	<b>Emissões</b>
Aquecimento Global	AG	kg CO <sub>2</sub> eq.	Global	CO <sub>2</sub> ; NO <sub>2</sub> ; CH <sub>4</sub> ; CF <sub>4</sub> CFC; HCFC; CH <sub>3</sub> Br
Depleção da Camada de Ozônio	DCO	kg CFC <sub>11</sub> eq.	Global	CFC; HCFC; CH <sub>3</sub> Br
Acidificação	AC	kg SO <sub>2</sub> eq.	Local	SO <sub>x</sub> ; NO <sub>x</sub> , HCL, HF, NH <sub>4</sub>
Eutrofização	EU	kg PO <sub>4</sub> eq.	Local	PO <sub>4</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub>

Fonte: Adaptada de Khasreen, Banfill e Menzies (2009).

### 3.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram interpretados, inicialmente, pela análise de inventário e, posteriormente, pela avaliação de impactos ambientais. Alguns resultados quantitativos foram comparados a outros estudos de ACV em edifícios comerciais.

Interpretaram-se os resultados da avaliação de impactos em relação à magnitude das atividades de operação individualmente e em relação umas às outras, para cada categoria de impacto. No primeiro momento, foi apresentado o panorama geral das atividades para todas as categorias fornecidas pelo modelo de caracterização. No entanto, apenas as 4 categorias de interesse foram analisadas.

Dessa forma, foi possível identificar os gargalos do sistema e avaliá-los de forma mais aprofundada, revelando os principais motivos pelos quais estes causam degradações e em quais categorias eles tem maior influência. Com a finalidade de minimizar esses pontos concentradores de impactos, foram propostas algumas medidas mitigadoras, de recomendações referenciadas, adequadas para a implantação durante a fase de uso do edifício. Essas medidas encontram-se no Apêndice.

Por último, foram simulados alguns cenários de melhorias ambientais dos gargalos com objetivo de interpretar melhor as reduções

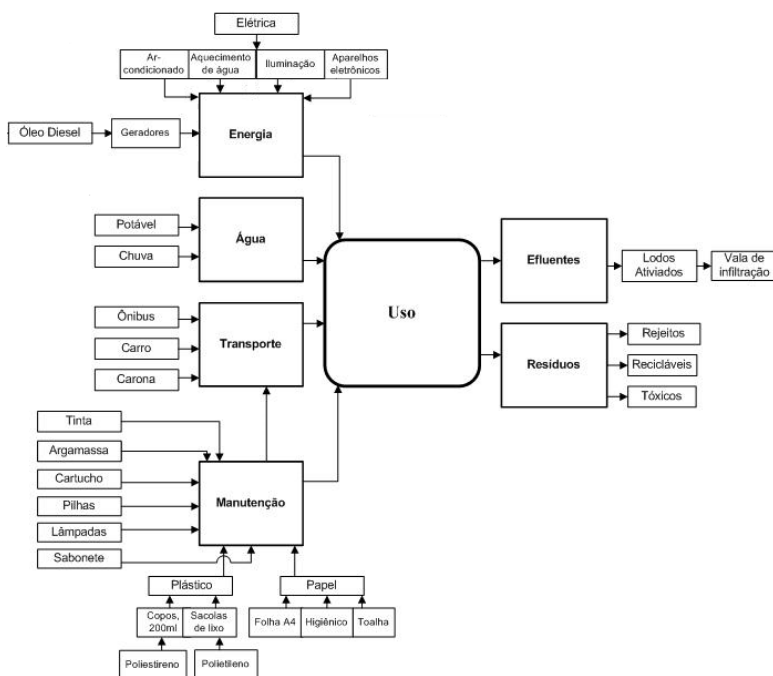
de impactos proporcionados por elas. Além disso, essas simulações indicam cenários que agregariam maior sustentabilidade ao edifício ao mesmo tempo que atribuiriam pontos para uma recertificação LEED mais conceituada (de maior pontuação). Minimamente, objetiva-se à certificação da categoria ouro.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Com a intenção de facilitar a interpretação dos componentes do sistema de produto, foi desenvolvido um fluxograma da fase de uso do edifício, com suas atividades e subsistemas. Esse fluxograma traduz o inventário para o formato de imagem e é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da fase de uso do edifício



Os resultados do inventário (ICV) estão compilados na Tabela 3, que contém as entradas e saídas de cada atividade, com suas respectivas porcentagens, valores e unidades.



Tabela 3 – Inventário do edifício com valores na unidade funcional, m<sup>2</sup>/ano.

Atividades	%	Dados Primários		Dados Modelados	
Entradas/ Saídas	-	Valor	Unid.	Valor	Unid.
<b>Água</b>	100	0,713	m³	713	kg
Água potável	30	0,214	m³	214	kg
Água da chuva	70	0,499	m³	499	kg
<b>Energia</b>	100	121,50	kWh	0,437	GJ
Ar-condicionado	53	63,76	kWh	0,230	GJ
Aparelhos eletrônicos	31	37,29	kWh	0,134	GJ
Iluminação	12	14,44	kWh	0,052	GJ
Aquecimento de água	4	4,81	kWh	0,017	GJ
Geradores	1	1,20	kWh	0,004	GJ
<b>Transporte</b>	100	110	Funcionários	82,82	km
Carro	80	88	Funcionários	72,44	km
Ônibus	11	12	Funcionários	10,38	km.pessoa
Caronas	9	10	Funcionários	0,00	km
<b>Resíduos</b>	100	24,05051	litros	3,15	kg
Rejeitos	84	20,20243	litros	2,65	kg
Recicláveis	15	3,60758	litros	0,47	kg
Tóxicos	1	0,24051	litros	0,03	kg
<b>Efluentes</b>					
Total de efluentes	100	0,241	m³	0,241	m³
<b>Manutenção</b>					
Papel higiênico (rolo)	-	0,3463	unidades	0,03013	kg
Papel toalha (rolo)	-	0,0866	unidades	0,03535	kg
Papel, folha A4	-	12,0253	unidades	0,05625	kg
Copo plástico, 200 ml (Poliestireno)	-	9,0189	unidades	9,01894	kg
Pilhas	-	0,0024	unidades	0,00006	kg
Tinta	-	0,0481	litros	0,06157	kg
Sacos de Lixo (Polietileno)	-	1,3228	unidades	0,03307	kg
Massa corrida	-	0,0447	litros	0,07688	kg
Cartuchos	-	0,0072	unidades	0,00720	unidades
Lâmpadas	-	0,0144	unidades	0,08658	USD
Sabonete Líquido	-	0,0120	litros	0,01203	kg

Na Tabela 3 dois valores e duas unidades estão descritos para uma mesma entrada/saída. Os chamados dados primários correspondem àqueles que foram coletados, enquanto que os dados modelados são os que foram recalculados para se adequar a unidade da base de dados e, depois, inseridos no software. Ambos os valores estão apresentados já na unidade funcional,  $\text{m}^2/\text{ano}$ .

Os cálculos, considerações e pressupostos, que caracterizaram o sistema de produto e resultaram nos dados modelados, estão descritos a seguir, para fornecer transparência e facilitar a compreensão do inventário. Junto a eles, os valores obtidos serão analisados e comparados a outras referências, quando possível:

**ENERGIA:** Conforme descrito anteriormente, a forma de consumo de energia predominante é a eletricidade da rede, com apenas 1% proveniente do óleo diesel dos geradores de emergência. O consumo anual de energia é de  $0,437 \text{ GJ}/\text{m}^2/\text{ano}$ , sendo o condicionamento de ar o principal consumidor ( $0,23 \text{ GJ}/\text{m}^2/\text{ano}$ ).

De acordo com Feist (1996), um edifício é considerado de alta eficiência energética, também chamado de *low-energy building*, quando requer aproximadamente  $0,432 \text{ GJ}/\text{m}^2/\text{ano}$ . Como o estudo de caso apresenta um valor muito próximo, ele pode ser considerado eficiente e sustentável no quesito energia, segundo essa referência.

Dados de consumo energético de uma amostra de 512 edifícios comerciais convencionais no município de Florianópolis, publicados por Signor (1999), relevam que a média de consumo anual é de  $0,425 \text{ GJ}/\text{m}^2$ . Esse fato poderia retificar a qualificação de eficiência energética afirmada anteriormente, pois seu consumo é muito semelhante à média dos edifícios convencionais da cidade e, em teoria, deveria ser menor. Porém deve-se considerar que o edifício opera também em horários não-comerciais (durante a noite e finais de semana, ou seja, 24 horas por dia) e exige uma refrigeração constante de alguns ambientes com equipamentos eletrônicos (servidores). Essas condicionantes agregam peso energético quando comparadas à operação de um edifício típico.

Somado a isso, Junnila (2004) avaliou o consumo de iluminação de um edifício comercial típico nos Estados Unidos, no valor de  $0,2 \text{ GJ}/\text{ano}$ . Este estudo de caso apontou para um valor de  $0,052 \text{ GJ}/\text{ano}$ , possibilitando concluir que há alta eficiência energética referente ao uso da iluminação, consequência das características sustentáveis (como excelência na iluminação natural) que o certificou.

Com o objetivo de proporcionar uma análise comparativa da demanda energética deste com outros estudos de caso, reuniram-se na

Tabela 4, referências de consumo de energia operacional extraídas de ACVs aplicadas em edifícios comerciais em diversas localidades.

Tabela 4 – Energia operacional média de edifícios comerciais.

Referência Bibliográfica	Localização	Energia operacional (GJ/m <sup>2</sup> /ano)
Citherlet e Hand (2002)	Suíça	0,47-0,55
Cole e Kernan (1996)	Canadá	0,94 - 1,76
Dimoudi e Tompa (2008)	Grécia	0,45 e 0,42
Ding (2004)	Austrália	0.30 a 0.50
Junnila, Horvath e Guggemos (2006)	Estados Unidos	0,86 (0,65 de eletricidade)
Junnila (2004)	Finlândia	0,89 (0,64 de eletricidade)
Junnila e Horvath (2003)	Finlândia	0,6 (0,35 de eletricidade)
Junnila (2003)	Finlândia	0,76 (0,25 de eletricidade)
Kofoworola e Gheewala (2009)	Tailândia	0,86
Li (2006)	Japão	0,424
Pullen (2000)	Austrália	0,5
Scheuer, Keoleian e Reppe (2003)	Estados Unidos	1,5 (0,4 de eletricidade)
Suzuki e Oka (1998)	Japão	0,85 - 1,6
Treloar et al. 2001	Austrália	0,4
Trusty e Meil (2000)	Canadá	0,64
Wu et al. (2011)	China	1,1
Xing, Xu e Jun (2008)	China	0,78 e 0,9
Zhang et al. (2006)	China	0,7
<b>Estudo de Caso</b>	<b>Brasil</b>	<b>0,437</b>

Conforme descrito previamente e visualizado na Tabela 4, a maioria das pesquisas consideram consumos em países de clima temperados com invernos bem rigorosos (Canadá, Estados Unidos, Finlândia, China). Esses países necessitam de energia para aquecimento dos ambientes (calefação), aumentando muito a demanda de energia operacional total (SARTORI e HESTNESS, 2007).

Uma pesquisa feita por Balaras et al. (2002), em 56 tipos de edifícios comerciais de nove países europeus, averiguou que a energia média anual de consumo é de 1,0 GJ/m<sup>2</sup>/ano, valor bem superior ao encontrado neste estudo. Entretanto, a pesquisa mostra que a parcela relativa apenas à eletricidade é de 0,5 GJ/m<sup>2</sup>/ano. Assim, pode-se inferir que, possivelmente, pelo menos metade do consumo é destinado ao aquecimento interno, que utiliza como fonte de energia o gás natural.

Por esse motivo, a energia operacional total nos edifícios comerciais de países frios é geralmente superior, dobro ou triplo, daquela verificada neste estudo de caso brasileiro. Todavia, quando se

tratam de valores apenas de eletricidade, há maior semelhança nos números, sendo o padrão médio europeu ainda superior (12%).

Por outro lado, quando comparados valores de países mais quentes (Grécia, Tailândia, Austrália), a energia operacional é mais equivalente à deste estudo, visto que também não se somam grandes quantidades de energia para calefação.

**ÁGUA:** O projeto de captação de água da chuva afirma proporcionar uma redução de 70% no consumo de água potável da rede. Sendo assim, assumiu-se que o uso de água potável, cujo valor exato foi fornecido pelos responsáveis, equivale a 30% e o restante do total (70%) é consumo de água da chuva.

No resultado da pesquisa de Junnila e Horvath (2003), o consumo de água na fase de uso de um edifício comercial convencional foi no valor total de  $0,3 \text{ m}^3$  por ano e neste estudo de caso, foi de  $0,71 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Apesar de parecer um resultado negativo para o edifício, esse valor alto pode ser explicado pela grande quantidade de água destinada à irrigação. No entanto, como essa atividade é realizada com água reutilizada da chuva, não provoca grandes impactos.

**TRANSPORTE:** Para calcular a quilometragem total resultante do uso dos transportes pelos funcionários (ida e volta de suas casas para o trabalho), foi levantada a informação de que praticamente todos os funcionários moram em Florianópolis. Por isso, adotou-se uma distância média de 15 km de percurso, que é a distância do empreendimento até o centro da cidade, totalizando 30 km diários (ida e volta) por funcionário. O meio de transporte utilizado pelos funcionários é ônibus ou carro e o número de funcionários que utiliza cada um deles depende do dia da semana. Assim, a quilometragem total rodada por ano foi calculada para cada tipo de transporte, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Quilometragem total rodada por ano para cada transporte.

Dias de trabalho	Total de Funcionários	Funcionários que usam carros	Funcionários que usam ônibus	Carro	Ônibus
	por dia	por dia	por dia	Quilometragem anual	
Seg.- Sex	110	88	12	696.960	95.040
Sábado	16	12	4	17.280	5.760
Domingo	8	6	2	8.640	2.880
Total km/ano				722.880	103.680
Total km/m <sup>2</sup> /ano				<b>72,44</b>	<b>10,39</b>

Percebe-se que a soma dos funcionários que utilizam os dois meios de transporte durante a semana não é equivalente à quantidade total de funcionários. Isso se justifica pelo fato de que alguns funcionários (aproximadamente 9%) vão e voltam de carona com outros, reduzindo a quantidade de veículos em percurso. Nos finais de semana, quando a quantidade de funcionários é consideravelmente menor, foi estimado que essas caronas não ocorrem.

**RESÍDUOS SÓLIDOS:** Segundo estimativa feita pelo responsável, o edifício gera uma média de 20 m<sup>3</sup> de resíduos por mês, sendo 84% rejeitos, 15% recicláveis e 1% tóxicos (lâmpadas, pilhas e baterias). Os rejeitos são coletados pela companhia municipal responsável (COMCAP) e destinados ao aterro sanitário. Os recicláveis também são coletados pela companhia, mas são destinados a um centro de triagem e, posteriormente, à respectiva indústria de reciclagem. Os tóxicos são recolhidos pelas empresas responsáveis pela sua fabricação que depois os reciclam ou destinam adequadamente, cumprindo a Lei 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS que estabelece a obrigatoriedade da logística reversa (BRASIL, 2010).

Sendo assim, assumiu-se que os resíduos tóxicos e seus encargos ambientais seriam de responsabilidade da fabricante. Para os rejeitos, que contém uma mistura de diversos materiais, foi considerado um mix (média) a partir de uma base de dados genérica de geração de resíduos municipal, que inclui um pouco de cada material.

No caso dos recicláveis, foi disponibilizada apenas a média da geração total, sem diferenciar cada tipo de material e suas respectivas quantidades, inviabilizando a inserção desses dados na modelagem. Para contornar este obstáculo recorreu-se a uma referência que caracterizou quali-quantitativamente os resíduos de 371 estabelecimentos comerciais nos Estados Unidos, fornecida pelo governo da Califórnia - *Califórnia Integrated Waste Management Board (CIWMB)*.

Através das porcentagens de geração total de resíduos de escritórios (CIWMB, 2006), adequaram-se os valores percentuais apenas para o total de recicláveis (68% do total) que incluiu papel, plástico, metal e vidro. Os valores de geração do edifício foram calculados multiplicando o total de recicláveis (0,47 kg/m<sup>2</sup>/ano) pela porcentagem de cada material, conforme mostra a

Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização quali-quantitativa dos resíduos recicláveis.

Resíduos Recicláveis		
Material	%	kg/m <sup>2</sup> /ano
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>0,47</b>
Papel	78,3	0,37
Plástico	17,1	0,08
Metal	2,20	0,01
Vidro	2,49	0,01

Também para fins de adequação dos valores ao software, o volume de resíduos, levantado em m<sup>3</sup>, teve que ser recalculado para quilogramas, através do peso específico dos resíduos. Na falta de uma caracterização física específica para resíduos de escritório, usou-se como referência o peso específico dos resíduos urbanos municipais de Florianópolis, igual a 131,00 kg/m<sup>3</sup> (COMCAP, 2002).

Porém, em função de o edifício ser do tipo escritório e a maior parte dos resíduos serem componentes leves, o peso específico modelado deveria ser menor que o referenciado pela COMCAP (SOARES, 2011). Uma sugestão de aperfeiçoamento deste dado seria caracterizar quali-quantitativamente os resíduos *in loco*, separando-os por material e pesando o total gerado de cada tipo.

É difícil comparar valores e impactos da geração de resíduos operacionais com outros estudos, pois a grande maioria não considera essa atividade como parte do ciclo de vida de um edifício (SARTORI e HASTNESS, 2007). Em uma das poucas referências encontradas, 33% dos resíduos gerados na fase operacional de um edifício situado na Finlândia são destinados à reciclagem (JUNNILA e HORVATH, 2003), enquanto neste estudo, são apenas 15%. É possível que este resultado seja um reflexo da falta de incentivo à reciclagem no contexto brasileiro, quando comparado ao de um país desenvolvido, alertando para a necessidade de melhorias na gestão de resíduos por meio da promoção da reciclagem.

**EFLUENTES:** Conforme descrito anteriormente, o valor da geração de efluentes foi obtido pelos registros de monitoramento da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). A média da vazão que a ETE recebe é 600 m<sup>3</sup> por mês, ou seja, 0,7215 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/ano. No entanto, essa quantidade é referente à vazão do objeto de estudo e mais dois blocos do centro empresarial Office Park. Como todos os blocos possuem características muito semelhantes, dividiu-se a vazão anual por três, para

obter um valor aproximado de um único bloco, resultando em uma geração de efluentes de  $0,241 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ano}$ .

Esse efluente é tratado nos fundos do terreno do empreendimento por um sistema de lodos ativados e depois destinado a uma vala de infiltração no solo. Devido à inexistência de base de dados de sistemas de tratamento *in loco*, modelou-se este fluxo com dados secundários. Essa base é fiel a este estudo por estar atrelada ao tratamento de lodos ativados porém, considera-se que o efluente é coletado pela rede pública e destinado para o corpo d'água (e o lodo para aterro) (DOKA, 2007; ROUX et al., 2010). Como a coleta e a destinação vinculadas à modelagem diferem da realidade, os resultados da avaliação de impactos para esta atividade podem ser superestimados.

**MANUTENÇÃO:** Os materiais destinados à manutenção, que foram analisados, são os de maior representatividade no cotidiano do edifício, segundo extratos de compras da operação do empreendimento. Inicialmente, as quantidades foram disponibilizadas na forma de unidades do material e tiveram que ser convertidas para a base de dados, geralmente em kg do elemento natural que o representa, por exemplo: unidades de sacola plástica para kg de polietileno. Essa conversão foi feita através de informações disponíveis nas descrições dos produtos (geralmente pela densidade ou peso de uma unidade), fornecidas pelos fabricantes. Com exceção das lâmpadas, cuja base de dados é monetária e foi assumida a equivalência de que uma lâmpada representa 6 dólares. Devido à grande quantidade de uso de copos plásticos, esses tiveram seu ciclo de vida modelado segundo o roteiro feito por Freese (2013).

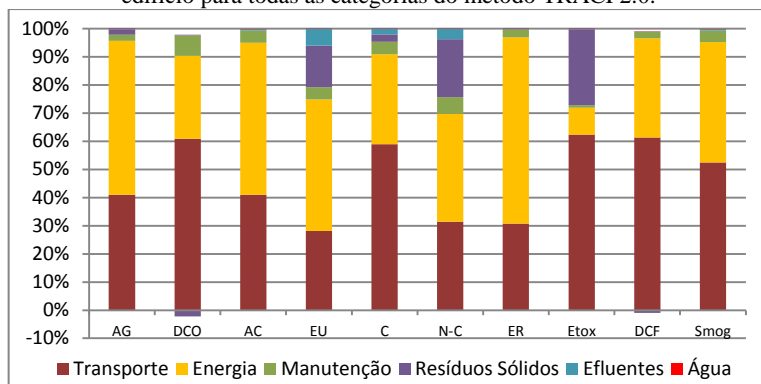
Não foi possível encontrar estudos de ACV em edificações comerciais passíveis de comparação para os valores de efluentes, transporte de funcionários e materiais de manutenção aqui expostos, impossibilitando uma análise mais crítica da quantificação e eficiência dessas atividades operacionais.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Os resultados da avaliação de impactos ambientais da fase de uso do edifício, discutidos a seguir, correlacionam a porcentagem de contribuição de cada atividade operacional para as categorias de impacto selecionadas. Primeiramente, com o objetivo de fornecer um panorama geral, a Figura 13 apresenta estes resultados para todas as categorias disponíveis no método TRACI 2.0: aquecimento global (AG), depleção da camada de ozônio (DCO), acidificação (AC), eutrofização (EU),

cancerígenos (C), não-cancerígenos (N-C), efeitos respiratórios (ER), Ecotoxicidade (Etox), depleção de combustíveis fósseis (DCF) e smog.

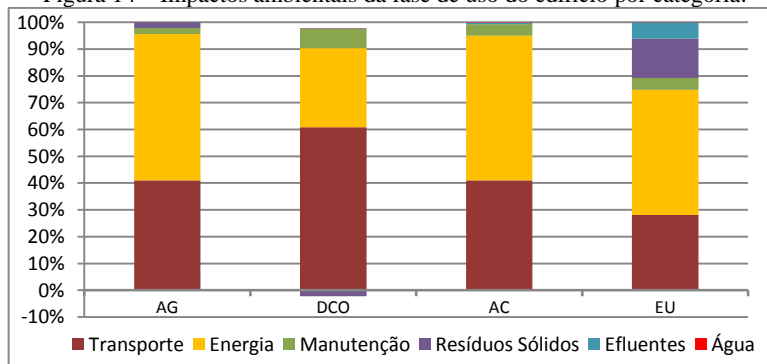
Figura 13 – Panorama geral dos impactos ambientais da fase de uso do edifício para todas as categorias do método TRACI 2.0.



É possível perceber a predominância do transporte de funcionários e da energia na maioria das categorias sendo que, em apenas três delas, os resíduos sólidos também tiveram uma contribuição representativa, chegando até mesmo a superar a energia na categoria Etox. Em contrapartida, os resíduos também somaram créditos positivos em quatro categorias, reflexo da destinação destes para a reciclagem.

A Figura 14 mostra apenas os resultados das categorias de interesse para este estudo, que serão as únicas interpretadas no decorrer desta avaliação (AG, DCO, AC e EU).

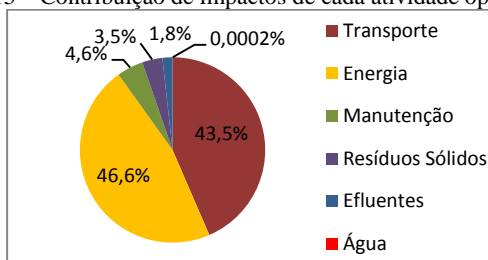
Figura 14 – Impactos ambientais da fase de uso do edifício por categoria.





Quase todas as atividades tiveram impactos em alguma categoria, com exceção do consumo de água, que apresentou impacto desprezível frente aos demais usos. É claramente perceptível que o transporte de funcionários e o consumo de energia são considerados os maiores responsáveis pelos impactos negativos do edifício sustentável. No gráfico da Figura 15 constam os valores médios percentuais do impacto total atribuído à cada atividade durante a operação do edifício para as quatro categorias detalhadas.

Figura 15 – Contribuição de impactos de cada atividade operacional.



O transporte e a energia juntos são os gargalos ambientais, pois somam de 74,8% a 95,7% de emissões em todas as categorias analisadas, respondendo por uma média de 90,1% do impacto total causado pelo edifício. A energia ainda apresenta impactos superiores que o transporte na maioria das categorias, com exceção da DCO.

Em seguida, a manutenção é a próxima atividade mais impactante. Ela aparece somando um pouco em cada categoria, porém com valores muito inferiores aos dois gargalos (4,6%). Os elementos mais prejudiciais dessa atividade são as lâmpadas, seguida pelo uso de tintas, provavelmente por causa de sua alta frequência de uso e/ou da forma de produção destes materiais.

A geração de efluentes teve um impacto bem baixo em quase todas as categorias, com exceção da eutrofização, em que ele teve maior destaque. Os resíduos sólidos também tiveram seu maior destaque na contribuição para eutrofização. Por outro lado, contribuem timidamente para o aquecimento global.

É importante salientar que há um ganho ambiental no uso dos resíduos, evitando a depleção da camada de ozônio em 2,3% e acidificação em 0,2%. Este fato pode ser explicado pela reciclagem de alguns materiais que evitam impactos ao inserir o resíduo novamente na cadeia cíclica, ao invés de extrair novos recursos naturais, e evitam o destino destes aos aterros sanitários.

Os impactos relacionados ao consumo de água podem ser negligenciados quando comparados a outras atividades de uso do edifício. Essa mesma conclusão foi averiguada na pesquisa feita por Junnila e Horvath (2003).

A Tabela 7 fornece a quantificação dos impactos ambientais totais do edifício e de cada atividade operacional. A magnitude desses resultados será discutida, a seguir, para cada categoria individualmente.

Tabela 7- Quantificação dos impactos ambientais.

<b>Categoria</b>	<b>AG</b>	<b>DCO</b>	<b>AC</b>	<b>EU</b>
<b>Unidade</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>	<b>mg CFC<sub>11</sub> eq.</b>	<b>g SO<sub>2</sub> eq.</b>	<b>g N eq.</b>
Transporte	24,24	2,15	75,67	34,24
Energia	32,32	1,04	99,65	56,78
Manutenção	1,28	0,25	7,99	5,33
Resíduos Sólidos	1,17	-0,08	-0,40	17,94
Efluentes	0,11	0,01	0,92	7,33
Água	0,000101	0,000004	0,000654	0,000281
<b>Total</b>	<b>59,12</b>	<b>3,38</b>	<b>183,83</b>	<b>121,63</b>

Das referências da Tabela 1 que avaliaram o potencial de aquecimento global, a maioria teve resultados totais da fase de uso muito semelhantes, em grandeza, ao encontrado neste estudo. Os valores em CO<sub>2</sub> eq. mais similares variaram de 52,08 a 74,82 kg, referentes aos 3 estudos de casos compilados por Junnila, Horvath e Guggemos (2006) e por Li (2006). Outras literaturas obtiveram valores um pouco menores, por volta de 30 a 35 kg de CO<sub>2</sub> eq. (CITHERLET e HAND, 2002; KOFOWOROLA e GHEEWALA, 2009; TRUSTY e MEIL, 2000;).

Essa categoria, também chamada de efeito estufa, é considerada a mais importante para essa avaliação, pois 80% de CO<sub>2</sub> emitido de edifícios provém da fase de uso (EUROPEAN COMMISSION, 2012). As atividades potencializadoras deste efeito, transporte e energia, somam juntas 95,7% das emissões, sendo a energia o aspecto dominante (54,7%). Tanto a manutenção quanto os resíduos sólidos colaboram minimamente nesta categoria, com aproximadamente 2% cada.

De forma muito semelhante ao AG, a porcentagem atribuída à energia e ao transporte para a acidificação foi, respectivamente, 54,2% e 41,2%. Em seguida, a manutenção também contribuiu, mas com um valor bem menor (4,3%). Em geral, os valores totais encontrados na literatura para a fase de uso também foram compatíveis com este estudo,

por volta de 129,36 a 238,58 g SO<sub>2</sub> eq. nos três casos de Junnila, Horvath e Guggemos (2006) e 146,7g SO<sub>2</sub> eq. segundo Li (2006).

Diferente do restante das categorias, na depleção da camada de ozônio o transporte é o maior vilão ambiental emitindo, sozinho, 63,7% de CFC-11 equivalente. A energia, normalmente representando os maiores impactos, emite aproximadamente metade disso (30,8%). Essa é a categoria que os produtos de manutenção mais impactaram, provocando 7,5% na degradação da camada de ozônio.

Na eutrofização mais uma vez a energia teve maior destaque (46%). Nesse caso, ela superou, em praticamente o dobro, o impacto do transporte. Essa foi a categoria que o transporte menos teve representatividade, emitindo 28,2% de N eq., porque outras atividades que favorecessem o excesso de nutrientes no solo ou na água disputaram pela contribuição dessa categoria.

As gerações de resíduos sólidos e de efluentes tiveram sua maior magnitude atrelada à eutrofização, cooperando com 14,7% e 6% das emissões, respectivamente. Os resíduos enviados para o aterro sanitário, chamados rejeitos, podem ser a causa dessa poluição, pois podem, eventualmente, poluir o solo ou águas subsuperficiais.

No que tange aos efluentes, este resultado era esperado e ocorreu de forma semelhante no estudo de Junnila e Horvath (2003). Ele é uma resposta da modelagem, cuja base de dados considerou um descarte final do efluente em corpo d'água, potencializando a ocorrência de nutrientes em excesso. Porém, na realidade o efluente tem como disposição final o solo, através de uma vala de infiltração. Ressalta-se que, caso o ciclo de vida desse sistema de tratamento descentralizado fosse modelado, esse resultado poderia sofrer alteração.

Além disso, a base de dados utilizada representa uma média de efluentes municipais, e não apenas para edifícios comerciais, incluindo pequenas frações de efluentes tóxicos industriais. Esse fator pode ter contribuído para que o impacto de eutrofização seja superior ao que existe na prática. No restante das categorias, os efluentes somaram valores muito baixos de impactos, variando de 0,2% a 0,5%.

Não foram encontrados valores comparáveis com fase de uso em edificações comerciais que avaliaram a DCO e a EU.

#### 4.3 GARGALOS DO SISTEMA

Para compreender melhor os gargalos da operação do edifício, as atividades com impactos de maior relevância, transporte e energia, serão analisadas individualmente.

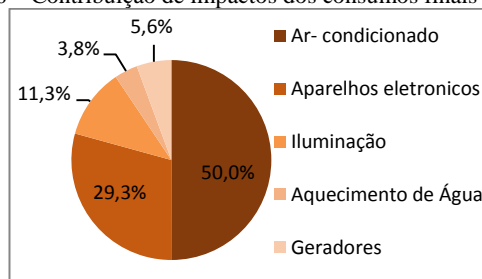
### 4.3.1 Energia

A energia operacional é o principal gargalo ambiental, pois contribui, em média, com 46,6% da totalidade de impactos da fase de uso do edifício e aparece como destaque em quase todas as categorias. A maior fração de sua degradação é causada pela eletricidade, responsável por 94,4% de emissões nas categorias analisadas (os outros 5,6% relacionam-se a energia do óleo diesel).

Esse gargalo era esperado pois, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2015), que toma por base valores de 2014, a fase de uso dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 50% da energia elétrica no país e esse valor vem crescendo anualmente.

A energia operacional neste estudo é composta por cinco parcelas de consumo final, destinadas à iluminação, ventilação, refrigeração, aquecimento e ao uso de diferentes equipamentos eletrônicos. No gráfico da Figura 16 estão apresentados os valores médios de contribuição de impactos de cada consumo final de energia.

Figura 16 – Contribuição de impactos dos consumos finais de energia.



O ar condicionado é o maior contribuinte de impactos ambientais, seguido pelos aparelhos eletrônicos. Esse resultado está em acordo com outros estudos (Kofoworola e Gheewala, 2009; Aun, 2004) e era esperado, pois os impactos estão diretamente relacionados ao consumo e ambos possuem as maiores demandas. O consumo de óleo diesel, embora seja apenas de 1% da demanda total de energia, causa um impacto ambiental mais significativo do que se esperava, de 5,6%, que chega a superar os impactos causados pelo aquecimento elétrico de água (3,8%).

Como a energia reflete diretamente na emissão de gases de efeito estufa (FAY, TRELOAR, IYER-RANIGA, 2000) e ela é o principal

gargalo do produto, fundamenta-se que o AG é a categoria de maior relevância para este estudo.

O consumo de energia elétrica provém da matriz nacional, cuja fonte principal – hidroelétrica - é renovável (BEN, 2015). Contudo, essa fonte ainda é a principal causa do AG neste caso, sendo responsável por 45,1% dos impactos para esta categoria. Embora essa fonte energética não gere grandes quantidades de CO<sub>2</sub> imediatamente, como as usinas termoeletricas, contribui com uma emissão indireta ao transformar extensas áreas de florestas em reservatórios (JOHN, 2000).

Paralelamente, as fontes não renováveis de energia no Brasil, mesmo sendo em menor parcela na escala global, são a segunda maior causa dos efeitos do AG. 15,3% deve-se à queima do petróleo em termoeletricas e 13% ao gás natural, ambos combustíveis fósseis.

Conforme citado anteriormente, o valor total de AG deste estudo, quando comparado a outras referências, mostrou-se bem semelhante e, por vezes, até maior. No entanto, esperava-se que esse resultado fosse inferior, pois, em teoria, a maior parte da eletricidade utilizada no Brasil vem de uma fonte “limpa”, enquanto que nos outros países, mais de 75% provém da queima de combustíveis fósseis (RAMESH, PRAKASH e SHUKLA, 2010). Contudo, outros problemas associados à matriz energética, como a sua distribuição, podem ter ocasionado o aumento deste impacto.

Nas categorias AC e DCO, o principal responsável pelo impacto da energia é a queima do petróleo nas termoeletricas. Já na eutrofização, o maior problema é causado pela exploração do carvão mineral, também usado nas usinas, que pode causar drenagem ácida. Essa drenagem é a principal forma de eutrofização hídrica em áreas mineradas, pois diminui o pH e libera substâncias tóxicas (CLARKE, 1995).

### **4.3.2 Transporte**

Uma média de 43,5% dos impactos totais da operação do edifício é atribuída ao transporte de funcionários. A causa de 93,9% desse total deve-se ao uso de automóveis, contra apenas 6,1% ao uso de ônibus. O transporte coletivo tende a ter impactos menores pois leva várias pessoas em um único veículo, enquanto os automóveis contabilizados levam apenas uma pessoa por rota (a quantidade de pessoas que vão e voltam de carona foi subtraída do total de funcionários que usam carro). Além disso, o número de funcionários no estudo de caso que se deslocam de ônibus é inferior ao número de funcionários que se deslocam de carro.

As emissões e degradações causadas pelo transporte – em todas as categorias - são responsabilidade, principalmente, dos combustíveis fósseis, em especial o petróleo para a gasolina e o diesel.

Usualmente, o transporte de trabalhadores não é incluído nas ACVs (SCHEUER, KEOLEIAN e REPPE, 2003), pois é difícil prever a ocupação do edifício. E os que consideraram, apenas analisaram o transporte de funcionários durante a fase de construção da obra. Portanto, não foi possível comparar os resultados finais de impactos com referências existentes.

Apesar disso, o transporte teve sua maior influência negativa na depleção da camada de ozônio, emitindo 63,7% do total de CFC<sub>-11</sub>, por causa da grande quantidade de óxidos nítricos e nitrosos expelidos pelos exaustores dos veículos. Assim, pode-se entender que a DCO é a categoria mais afetada por este gargalo, sendo portanto, o segundo impacto mais relevante para este estudo (perdendo apenas para o AG).

#### 4.4 ANÁLISE DE CENÁRIOS

Com a intenção de interpretar mais claramente a redução de impactos proporcionados por melhorias na operação, alguns cenários foram modelados (focando nos dois principais gargalos) alterando-se variáveis de entrada que tendem a oferecer uma condição mais favorável ao edifício em termos de performance ambiental.

Para isso, comparou-se o cenário original da operação do edifício, chamado de cenário base, a cenários modelados com uma das medidas mitigadoras propostas no Apêndice. As medidas escolhidas foram aquelas julgadas mais adequadas ao empreendimento, ao mesmo tempo, atenderam aos pré-requisitos exigidos para uma nova certificação LEED v3, própria para a operação e manutenção de edifícios existentes.

Essa nova certificação foi usada como critério sob a justificativa de valorizar ainda mais a sustentabilidade do edifício ao alcançar um certificado de maior pontuação - no mínimo ouro (60 pontos). Esse fato representaria um maior apelo junto ao empreendedor, o qual teria um retorno do investimento da redução de impactos em uma forma palpável, podendo utilizá-la como marketing “verde”.

Logo, simularam-se dois cenários para a energia (cenários 1 e 2), em que a energia solar foi integrada ao edifício. Essa escolha objetivou trocar uma porcentagem do consumo de eletricidade, em parte produzida pela queima de combustíveis fósseis de termoeletricas, por uma fonte exclusivamente renovável e produzida *in loco*. Scheuer, Keoleian e Reppe (2003) e Cabeza et al., (2014) descrevem que essa

medida pode reduzir consideravelmente os impactos ambientais da etapa operacional.

Para os transportes foram simulados três cenários (cenários 3, 4 e 5) de redução da quantidade de funcionários que utilizam carro para ir e voltar do trabalho. A mesma quantidade foi alocada proporcionalmente a formas alternativas - mais sustentáveis - de transporte, como ônibus, caronas, bicicleta e caminhadas.

Através do valor percentual de otimização na performance do edifício, acumula-se diferentes pontuações na certificação LEED v3 conforme a Tabela 8<sup>2</sup>. Por isso, diferentes cenários foram simulados para uma mesma medida mitigadora, variando-se as porcentagens de otimização da mesma.

Tabela 8 – Pontuação LEED correspondente a porcentagem de otimização da performance operacional em cada cenário.

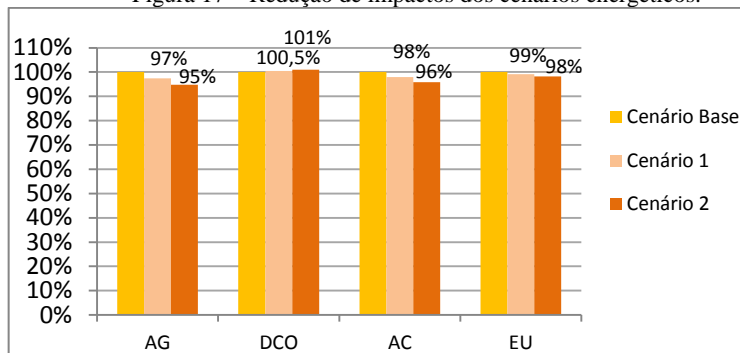
Medida mitigadora	Cenário	Porcentagem	Pontuação LEED v3
Geração de energia solar	Cenário 1	6%	3
	Cenário 2	12%	6
Redução do uso de automóveis	Cenário 3	25%	7
	Cenário 4	50%	11
	Cenário 5	75%	15

Na modelagem do cenário 1, a implantação de energia solar corresponde à geração de 6% do consumo de eletricidade (7,21 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e, no cenário 2, a geração é de 12% (14,43 kWh/m<sup>2</sup>/ano). Essa energia renovável pode ser destinada ao aquecimento de água (térmica) ou à geração de eletricidade (fotovoltaica). Na Figura 17 pode ser visualizado o resultado da avaliação de impactos da etapa operacional do edifício para ambos os cenários de energia, normalizados em relação ao cenário base (100%).

---

<sup>2</sup> Documento com as pontuações e exigências LEED v3 para prédios existentes disponível em: <<http://gbcbrazil.org.br/leed-existing-building.php>>.

Figura 17 – Redução de impactos dos cenários energéticos.



É possível perceber que a geração de energia solar reduz a maioria dos impactos ambientais de maneira proporcional (se dobrarmos a geração, o impacto cai à metade), com exceção da DCO. A DCO teve um acréscimo mínimo de 0,5 a 1%, provavelmente devido à fabricação dos painéis solares, pois durante a operação não ocorrem emissões atmosféricas provenientes dessa fonte (FUKUROZAKI, 2011).

O aquecimento global foi o impacto mais minimizado, em 3% no cenário 1 e 5% no cenário 2. A acidificação, em seguida, em 2% e 4% e a eutrofização, com menor proporção, apenas 1% e 2%, respectivamente. Apesar de parecer pouco, essa mitigação é bastante significativa pois ela será reduzida por  $m^2$  do edifício, a cada ano. Ou seja, no caso do AG, por exemplo, no final de um ano poderá ser evitado o lançamento de 15.326 ou 30.631 kg de  $CO_2$  (dos cenários 1 e 2, nesta ordem). Logo, no final da vida útil (aproximadamente 50 anos) o resultado final de danos evitados alcançará grandes proporções.

Nas simulações feitas para o transporte, o cenário 3 assumiu uma redução de 25% na quantidade de uso de automóveis e, por consequência, dobrou-se o número de funcionários que utilizam tanto ônibus quanto outros transportes alternativos. No cenário 4, o número de carros foi 50% menor, triplicou-se o número do uso de ônibus e o restante foi somado a outros transportes alternativos. No cenário 5, foi diminuído em 75% o uso de automóveis, aumentado em 5 vezes o uso de ônibus e o restante distribuído para carona, caminhada ou bicicleta. Na Tabela 9 está resumida a quantidade de funcionários que utiliza cada meio de transporte nos cenários descritos.

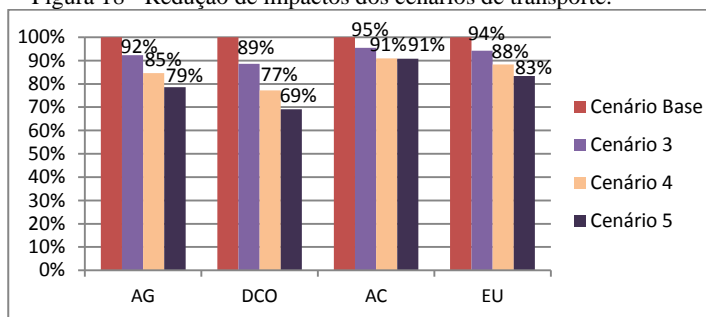


Tabela 9 – Número de funcionários que utiliza cada meio de transporte nos cenários avaliados.

Meio de transporte	Quantidade de funcionários			
	Cenário Base	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Carro	88	66	44	22
Ônibus	12	24	36	60
Outros (Carona, caminhada ou bicicleta)	10	20	30	28

É Importante ressaltar que, por motivos de simplificação, esses cenários consideraram apenas o transporte durante a semana, excluindo-se sábados e domingos. Na Figura 18 estão apresentados os resultados dos três cenários normalizados em relação ao cenário base.

Figura 18 - Redução de impactos dos cenários de transporte.



Todas as categorias de impactos tiveram redução significativa ao optar-se por transportes alternativos ao invés do carro. Mesmo a menor porcentagem de redução do número de automóveis, cenário 3, acarreta em 5 a 11% a menos de emissões na operação do edifício

Conforme esperado, a categoria que mais sofreu influência foi a DCO, reduzindo progressivamente cerca de 10% a emissão de CFC<sub>11</sub> a cada cenário mais eficaz, podendo chegar a uma redução de 31% no cenário 5. O AG também foi mitigado de forma representativa, 8-21% menor, seguido da EU, que diminui 6-17% a emissão de N eq. A acidificação foi a categoria menos afetada, reduzindo apenas de 5-9%, sendo que na mudança do cenário 4 para o 5 não houve redução.

Ao comparar os resultados de todos os cenários durante a fase de uso, infere-se que minimizar o uso de automóveis pelos funcionários é mais sustentável que implantar a tecnologia para geração de energia solar. Por isso, entre uma ou outra opção, a mitigação no uso de transportes deve ser a providência prioritária de investimento do

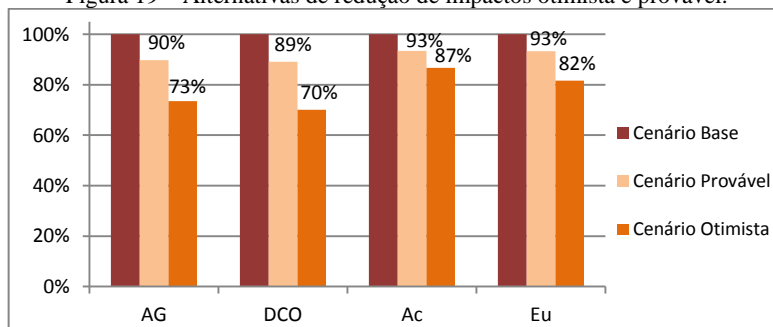
empreendimento. Além do mais, a substituição por transportes alternativos vale mais pontos na nova certificação LEED (Tabela 8).

Apesar disso, a tomada de decisão deve levar em conta outros aspectos e esferas da sustentabilidade, que não a ambiental, antes de aplicar as propostas. Por exemplo, enquanto a implantação da energia solar tem a barreira da viabilidade financeira, a redução no uso de automóveis compete com aspectos culturais e sociais dos usuários, difíceis de serem exigidos e mudados.

No entanto, supondo-se que ambas as medidas sejam adotadas, simulou-se a junção dos cenários de transporte e energia em duas alternativas de implantação, uma otimista e uma mais provável. A otimista é composta pelos cenários 2 e 5, que possuem maior redução de impactos, mas ao mesmo tempo são mais difíceis de serem alcançados. Já a alternativa mais provável soma o cenário 1 e o 3, cujos resultados podem parecer menos significativos perto dos demais, no entanto a possibilidade de serem introduzidos na operação do edifício é maior.

A Figura 19 normaliza as reduções de impactos das alternativas otimista e provável em função do cenário base atual.

Figura 19 – Alternativas de redução de impactos otimista e provável.



Nota-se que a melhoria ambiental da alternativa mais provável de implantação varia de 7 a 11%. Mas, como previsto, o cenário otimista tem uma performance bem superior, principalmente pelo fato de que ele reduz praticamente 30% das emissões nas categorias mais importantes deste estudo, AG e DCO. A AC foi a categoria que apresentou menor alteração, com uma porcentagem de redução do cenário otimista bem próxima ao cenário provável (7 e 13% respectivamente). E a EU teve 10% a mais de melhoria no cenário otimista.

Para complementar os resultados e auxiliar a tomada de decisão, a Tabela 10 apresenta o somatório da pontuação LEED v3 que ambas as

alternativas podem proporcionar ao empreendimento a fim de auxiliar a aquisição da nova certificação.

Tabela 10 – Pontuação LEED correspondente as alternativas otimista e provável.

Alternativa Provável	Pontuação LEED v3	Alternativa Otimista	Pontuação LEED v3
Ser certificado	4	Ser certificado	4
Cenário 1	3	Cenário 2	6
Cenário 3	7	Cenário 5	15
Total	14	Total	25
Porcentagem adquirida para a certificação ouro	23%	Porcentagem adquirida para a certificação ouro	42%

O empreendimento já inicia com 4 pontos, pois o mesmo possui uma certificação da fase de construção, depois soma-se os pontos de cada cenário. No final conclui-se que a porcentagem total de pré-requisitos adquiridos para conseguir a nova certificação é de 23% na alternativa mais provável e 42% na otimista.

Embora, obviamente, a alternativa otimista seja melhor, tanto na redução de impactos quanto no somatório de pré-requisitos para obter a certificação, a combinação dos cenários mais prováveis também tem uma melhoria bastante significativa e representaria um excelente ganho ambiental para o edifício ao longo de sua vida útil.

Ao implantar apenas mais um ou outro pré-requisito, facilmente se alcançarão os 60 pontos necessários para o certificado ouro (para ambas as situações). Aumentar a eficiência energética seguindo algumas das medidas propostas no Apêndice, por exemplo, pode somar até 18 pontos e reduzir, consideravelmente, o impacto causado pela operação do edifício.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho quantificou e analisou os principais impactos causados pelo uso de um edifício comercial com características sustentáveis. Das principais atividades operacionais avaliadas, identificou-se que a energia e o transporte foram as que mais contribuíram com impactos ao meio ambiente (90,1% do total na média das 4 categorias analisadas em maior detalhe), sendo que o consumo de energia foi o principal gargalo, com 46% do total em média das categorias de impacto, dominando em quase todas as categorias.

Esperava-se que esse consumo iria liderar, de longe, todas as categorias de impacto, mas o transporte de funcionários veio seguindo-o com porcentagens altas de contribuição (43,5%), chegando até a superar a carga energética na categoria de DCO. A demanda pela eletricidade, principalmente para o ar-condicionado, e o uso de automóveis pelos funcionários para ir e voltar do trabalho são os principais agentes responsáveis pela degradação e devem ser alvos de investimento na gestão do edifício, visando à melhoria da qualidade ambiental.

As demais atividades tiveram contribuições menos significativas, sendo que todas juntas (manutenção, geração de resíduos, efluentes e consumo de água) correspondem, em média, a apenas 10% do impacto total da fase de operação. A manutenção somou emissões em todas as categorias, mas teve seu maior destaque na categoria de acidificação, sendo os impactos do consumo de água praticamente desprezíveis. Os resíduos e os efluentes foram mais expressivos na eutrofização, mas possivelmente sua quantificação foi superior à realidade devido às limitações da modelagem.

Os resultados, tanto do inventário quanto da avaliação de impactos mostraram-se, em geral, similares a outros estudos da literatura, mesmo com as diferenças existentes entre as regiões comparadas. E, como muitas referências ressaltam a importância da energia na fase de uso, foi possível encontrar e comparar os resultados de consumo anual e dos impactos desse principal gargalo. Dessa forma conclui-se que, apesar de o empreendimento ter algumas condicionantes (opera 24 horas e com refrigeração constante em certos ambientes) que elevam a demanda de energia, ele possui características de eficiência energética. Por outro lado, a avaliação de impactos mostrou que o edifício aparenta não ser tão eficiente do ponto de vista de emissões de CO<sub>2</sub> quando comparado com as referências.

No quesito consumo de água, foi comprovada a sustentabilidade do edifício pela baixa expressividade desta, tanto na demanda de água da rede quanto nas emissões de impactos. Os resíduos, por outro lado, mesmo que somando impactos positivos em algumas categorias, mostraram que o empreendimento falha em incentivar mais a reciclagem e o reuso de materiais, sendo a maioria enviada como rejeito para o aterro sanitário. Mesmo não sendo um gargalo, essa atividade também deve ser considerada como ponto crítico de atuação para melhorias.

Algumas medidas mitigadoras foram propostas para minimizar os gargalos ambientais, com foco na substituição de parcela da eletricidade da rede pela geração de energia solar e na troca do uso de automóveis por transporte alternativos. Essas medidas contemplaram

apenas os gargalos por uma questão de prioridade, mas melhorias podem ser aplicadas em todas as atividades operacionais.

Ambas as medidas foram simuladas em possíveis cenários que, além de aumentar a sustentabilidade do edifício, proporcionariam uma certificação LEED mais valorizada. A análise de cenários provou que ambos os benefícios são representativos, cujo resultado final de danos evitados alcança consideráveis proporções ao longo da vida útil deste. Nesse contexto, a situação mais indicada é minimizar o uso de automóveis, pois possui um alto potencial de redução de emissões e, além do mais, essa medida favorece a obtenção de mais pontos no processo de recertificação LEED.

Simularam-se também algumas alternativas em que ambas as medidas são adotadas em um cenário otimista e outro mais provável. A combinação de cenários mitigadores proporcionou uma redução anual de 7-11% dos impactos na alternativa mais provável, chegando até 30% de redução das principais categorias (AG e DCO) no mais otimista. E a porcentagem de pontuação adquirida que pode auxiliar a certificação ouro é de 23% e 42%, respectivamente, para cada alternativa. Este resultado comprova o importante benefício ambiental que o edifício pode ter ao adotar medidas mais sustentáveis.

Apesar das incertezas associadas ao resultado, reflexo de pressupostos e situações assumidas para viabilizar a modelagem do sistema de produto, a metodologia utilizada nessa análise pode ser considerada uma excelente ferramenta para investigar a qualidade ambiental dos edifícios, com a diretiva de mensurar seu desempenho, quantificar seus impactos e avaliar a redução da carga ambiental, se alternativas compensatórias forem adotadas. Através dos resultados da ACV foi possível fornecer suporte à tomada de decisões para os envolvidos, ao identificar pontos críticos onde há oportunidade de gerir seus passivos ambientais. Além disso, a análise de cenários pela ACV facilita a compreensão do empreendedor, que pode facilmente perceber, dentre algumas soluções, as melhores práticas de construção.

Espera-se que este trabalho forneça informações para o meio técnico utilizar como base na certificação ambiental das edificações do Brasil. Os indicadores e resultados devem favorecer o processo LEED para edificações em operação, tanto ao antecipar novas exigências do mesmo quanto ao verificar e validar, na prática, as medidas mitigadoras adotadas, favorecendo certificações mais qualificadas.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de a fase de uso ser considerada a mais impactante no ciclo de vida de uma edificação, existe uma clara interação dela com as demais. Por isso, no sentido de prosseguir com investigações de ACV aplicadas para edificações, todas as etapas do ciclo de vida devem ser analisadas de forma global e integrada.

Outra estratégia para o desenvolvimento de futuras pesquisas é analisar outros edifícios comerciais brasileiros, convencionais e sustentáveis, e também edifícios com outras funções (residencial, serviços, turismo, educação, etc.), para compará-los a estes resultados. As demais categorias de impactos existentes nos métodos de avaliação devem também ser investigadas. Sugere-se, ainda, incluir a investigação de impactos causados à vizinhança e à qualidade do ambiente interno, cuja avaliação compreende efeitos sobre os ocupantes e suas percepções.

Alguns dados do inventário podem ser melhorados, como os tratamentos de resíduos e de efluentes. Com os dados de resíduos sólidos, que foram estimados, pode-se realizar uma caracterização quali-quantitativa in loco para aperfeiçoar os resultados. A coleta, tratamento e destinação dos efluentes podem ser modelados para a realidade do local, especificamente (lodos ativados com vala de infiltração). Com isso, futuros estudos com dados mais precisos e detalhados de inventários serão viáveis, possibilitando a inclusão de aspectos da fase de uso que foram, por hora, excluídos deste estudo.

Na busca de diretrizes que norteiem o rumo das construções sustentáveis brasileiras, através da metodologia ACV, faz-se necessária a avaliação de cenários com diferentes técnicas de eficiência da performance dos edifícios, principalmente a energética, a fim de avaliar a redução de impactos no ciclo de vida para desenvolver indicadores de sustentabilidade para realidade brasileira.

Por fim, ressalta-se que é de grande importância que as avaliações considerem, além da questão ambiental, os outros eixos da sustentabilidade, conciliando a redução de impactos à viabilidade econômica e ao benefício social (conforto, satisfação e produtividade dos usuários).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, versão digital, 2009a. 21p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044: **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, versão digital, 2009b. 46 p
- ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of buildings: a method. **Building and Environment**, v. 32, n. 4, p. 317-320, 1997.
- ARAÚJO, M. A. A moderna construção sustentável. **IDHEA- Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica**, 2008. Disponível em: <<http://www.idhea.com.br/pdf/moderna.pdf>> Acessado em: 21 de agosto de 2015.
- ARENA, A. P.; DE ROSA, C. Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza—Argentina. **Building and Environment**, v. 38, n. 2, p. 359-368, 2003.
- ARPKE, A.; HUTZLER, N. Operational life-cycle assessment and life-cycle cost analysis for water use in multioccupant buildings. **Journal of Architectural Engineering**, v. 11, n. 3 p. 99–109, 2005.
- ASSIES, J. State of Art. **Life-Cycle Assessment**, Netherlands: SETAC, Leiden, p.1-20, 1992.
- AUN, C. S. **Energy efficiency: designing low energy buildings using energy 10**. CPD Seminar. Malasia. p. 1-18, 2004.
- BALARAS, C.A et al. Assessment of energy and natural resources conservation in office buildings using TOBUS. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 2, p. 135-153, 2002.
- BARE, J. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 13, n. 5, p. 687-696, 2011.

BARE, J. **Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI): User's guide and system documentation.** Cincinnati, Ohio, National Risk Management Research Laboratory, USEPA Office of Research and Development, 2002.

BEN, Balanço Energético Nacional. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2015.** Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/default.aspx>>. Acessado em: 15 de outubro de 2015.

BLENGINI, G. A.; DI CARLO, T. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. **Energy and buildings**, v. 42, n. 6, p. 869-880, 2010.

BLOM, Inge. **Environmental impacts during the operational phase of residential buildings.** Holanda: IOS Press BV, 2010. 195 p.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. **Life-cycle analysis of buildings: environmental impact of building elements.** Guimarães: iiSBE Portugal, Portugal, 2012.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R.; KOUKKARI H. **Assessment of building sustainability.** In: L. Braganca (Ed.), , Sustainability of Constructions, Integrated Approach to Life-time Structural Engineering: COST C25 Workshop, Lisboa: Multicomp, setembro 2007, p. 3–12.

BRASIL, Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Estabelece a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 2010.

BRASIL, Instrução Normativa MPOG/SLTI Nº 2, de 4 de Junho de 2014. Dispõe o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. Diário Oficial da União de 05/06/2014. Brasília, DF, 2014.

BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S.. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510-2520, 2009.



BUCHANAN, A. H.; HONEY, B. G. Energy and carbon dioxide implications of building construction. **Energy and Buildings**, v. 20, n. 3, p. 205-217, 1994.

BUENO, C. **Avaliação de desempenho ambiental de edificações habitacionais**: Análise comparativa dos sistemas de certificação no contexto brasileiro. 2010. 123 p. (Tese de Doutorado) -Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BURNETT, J. **Indoor environments in Hong Kong's high-rise residential buildings**. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2004.

BUWAL 250. **Life cycle inventory for packagings**, vols. I and II. Environmental series no. 250/I and II. Berne, Switzerland: Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL); 1998.

CABEZA, L. F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 29, p. 394-416, 2014.

CAIRNS REGIONAL COUNCIL. **Sustainable Tropical Building Design: Guidelines for Commercial Buildings**. 2011. Disponível em: <[http://www.cairns.qld.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0003/45642/BuildingDesign.pdf](http://www.cairns.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/45642/BuildingDesign.pdf)>. Acessado em: 24 de setembro de 2015.

CEN/TC 350. **Sustainability of construction works**. Disponível em: <[http://portailgroupe.afnor.fr/public\\_espacenormalisation/CENTC350/index.>](http://portailgroupe.afnor.fr/public_espacenormalisation/CENTC350/index.>). Acessado em: 23 de setembro de 2015.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos**: Ferramenta Gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 104 p.

CHENG, E.W.L; CHIANG, Y. H.; TANG, B. S. Exploring the economic impact of construction pollution by disaggregating the construction sector of the input-output table. **Building and Environment**, v. 41, n. 12, p. 1940-1951, 2006.

CIB. International Council For Research And Innovation In Building And Construction. **Agenda 21 para a Construção Sustentável**. Tradução do Relatório CIB - Publicação 237. Tradução de I. Gonçalves, T. Whitaker; ed. de G. Weinstock, D. M. Weinstock. São Paulo, 131p., 2000.

CITHERLET, S. **Towards the Holistic Assessment of Building Performance Based on an Integrated Simulation Approach**. Swiss Federal Institute of Technology EPFL: Lausanne, Switzerland, 2001.

CITHERLET, S.; HAND, J. Assessing energy, lighting, room acoustics, occupant comfort and environmental impacts performance of building with a single simulation program. **Building and environment**, v. 37, n. 8, p. 845-856, 2002

CIWMB, California Integrated Waste Management Board. **Designing with Vision: A Technical Manual for Materials Choices in Sustainable Construction**. Resource Manual Publication. Sacramento, California, 2000.

CIWMB, California Integrated Waste Management Board. **Waste Disposal and Diversion Findings for Selected Industry Groups**. California, No 341-06-006, 2006. Disponível em: <<http://www.calrecycle.ca.gov/publications/Documents/Disposal%5C34106006.pdf>> Acessado em: 5 de outubro de 2015.

CLARKE, L.B. **Coal mining and water quality**. IEA Coal Research, London, UK. 1995, 99p.

COLE, R. J.; KERNAN, P. C. Life-cycle energy use in office buildings. **Building and environment**, v. 31, n. 4, p. 307-317, 1996.

COMCAP. **Caracterização Física dos Resíduos Sólidos Urbanos de Florianópolis**. Florianópolis, 2002.

CURRAN, M. A. Environmental life-cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 3, p. 179-179, 1996.

CURWELL, S. et al. The green building challenge in the UK. **Building Research & Information**, v. 27, n. 4-5, p. 286-293, 1999.

DANIELS, P.; MOORE S. Approaches for quantifying the metabolism of physical economies: Part I: Methodological overview. **Journal of Industrial Ecology**, v. 5, n. 4, p. 69-93, 2001.

DEEKE, V.; CASAGRANDE JR, E. F.; SILVA, M. C. **Edificações Sustentáveis em Instituições de Ensino Superior**. In: 7º Seminário Internacional NUTAU 2008 - Espaço Sustentável - Inovações em Edifícios e Cidades, São Paulo. 2008.

DEGANI, C. M.; CARDOSO, F. F. **A sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de edifícios: a importância da etapa de projeto arquitetônico**. In : NUTAU 2002 - Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 7 a 11 outubro 2002.

DE HAES, H., et al.. Discussion of General Principles and Guidelines for Practical Use. In: de Haes, H. (Ed.). **Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment**. Brussels, Belgium: SETAC-Europe. 1996. pp.7-30

DIMOUDI, A.; TOMPA, C. Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1, p. 86-95, 2008.

DING, G. K. C. **The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities**. 2004. 312 p. (Thesis) - Faculty of Design, Architecture & Building, University of technology, Sydney, Australia, 2004.

DOKA G. **Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services**. Ecoinvent report N°13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 55p. 2007.

EIO-LCA. Carnegie Mellon University Green Design Initiative. **Economic Input-Output Life-cycle Assessment (EIO-LCA) Model**.

2003. Disponível em: <<http://www.eiolca.net>> Acessado em: 4 de outubro de 2015.

EPA, Environmental Protection Agency. **Sustainable Building Technical Manual. GreenBuilding Design, Construction and Operations**. Estados Unidos: Public Technology Inc. Green Building Council. EUA, 1996. 292 p.

EUROPEAN COMMISSION. **Directorate General XII for Science, Research and Development. Environmental impact of buildings: application of the life cycle analysis to buildings**. Paris: Center for Energy Studies, 1997. 145 p.

EUROPEAN COMMISSION, Communication on Sustainable buildings. 2012. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned\\_ia/docs/2013\\_env\\_008\\_sustainable\\_building\\_s\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned_ia/docs/2013_env_008_sustainable_building_s_en.pdf)>. Acessado em: 09 de outubro de 2015

FAY, R.; TRELOAR, G.; IYER-RANIGA, U.. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. **Building Research & Information**, v. 28, n. 1, p. 31-41, 2000.

FEIST, W. **Life-cycle energy balances compared: low-energy house, passive house, self-sufficient house**. The International Symposium of CIB W67, Vienna, Austria, 183–190 p., 1996.

FERRÃO, P. C. **Introdução à Gestão Ambiental: A Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos**. Lisboa: IST Press, 1998. 219 p.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos**. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu. 2004.

FERREIRA, B. L. A. **Construção de Edifícios Sustentáveis: Contribuição para a definição de um Processo Operativo**. 2010. 126 p. (Dissertação de Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

FONSECA, M. L. M. **Contribuições dos Certificados Leed, Aqua (HQE) e Breeam para a Qualificação Qualiverde em Edificações Sustentáveis na Cidade do Rio de Janeiro**. 2014. 120p. (Dissertação

de Mestrado) - Engenharia Urbana e Ambiental, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.

FOSSATI, M. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios: O caso de escritórios em Florianópolis**. 2008, 340 p. (Tese de Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FREESE, J. T. **Análise do ciclo de vida de copos plásticos de poliestireno e de canecas de cerâmica utilizados para servir café em um ambiente de trabalho**. 2013. 69 p. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Departamento de Engenharia Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

FRISCHKNECHT, R. et al. The ecoinvent database: Overview and methodological framework. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 1, p. 3-9, 2005.

FUKUROZAKI, S. H. **Avaliação do Ciclo de Vida de Potenciais Rotas de Produção de Hidrogênio**: Estudo dos Sistemas de Gaseificação da Biomassa e de Energia Solar Fotovoltaica. 2011. 179 p. (Tese de Doutorado) – Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GBCB, Green Building Council Brasil. **Página Institucional**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br>>. Acessado em: 21 de agosto de 2015.

GBIG, Green Building Information Gateway. **Página Institucional**. Disponível em: <<http://www.gbig.org/activities/leed-1000020388>>. Acessado em: 16 de agosto de 2015.

GIZMAG. Disponível em: <<http://www.gizmag.com/solar-powered-runway-de-icing/20520/pictures>> Acessado em: 19 de outubro de 2015.

GMECV, Guia Metodológica Estudio del Ciclo de Vida. **Proyecto Minimización de Residuos provenientes de Envases y Embalajes**. Chile, 2001. Disponível em: < [www.sinia.cl/1292/articles-30871\\_recurso\\_1.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-30871_recurso_1.pdf)>. Acessado em: 22 de agosto de 2015.

GRIFFITH B. et al. **Assessment of the technical potential for achieving zero-energy commercial buildings**. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Conference Paper NREL/CP-550-39830, Junho 2006.

GUINÉE, J. B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The international journal of life cycle assessment**, v. 7, n. 5, p. 311-313, 2002.

GUINÉE, J. B.; DE HAES, H. U.; HUPPES, G. Quantitative life cycle assessment of products: 1: Goal definition and inventory. **Journal of Cleaner Production**, v. 1, n. 1, p. 3-13, 1993.

GUINEE, J. B.; HEIJUNGS, R. A Proposal for the Definition of Resource Equivalency Factors for use in Product Life-cycle Assessment. **Environmental Toxicology and Chemistry**, vol.14 (5), 917-925, 1995.

HEIJUNGS, R., et al. **Environmental Life Cycle Assessment of Products - Backgrounds and Guide LCA**. Leiden: CMLCentre of Environmental Science. 1992.

ITARD, L.; KLUNDER, G.. Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction. **Building Research & Information**, v. 35, n. 3, p. 252-267, 2007.

JENSEN, A. A. (coord.). **Life-Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources**. Copenhagen: Report to the European Environmental Agency, 1997.

JOHN, G.; CLEMENTS-CROOME, D.; JERONIMIDIS, G. Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world. **Building and environment**, v. 40, n. 3, p. 319-328, 2005.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; SILVA, V. G.; AGOPYAN, V. Agenda 21: uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro. **II Encontro nacional e I**

**Encontro latino americano sobre edificações e comunidades sustentáveis.** Anais... ANTAC/UFRGS, Canela-RS, p. 24-27, 2001.

JUNNILA, S. Estimating the environmental aspects of an office building's life cycle. In: **Proc., Int. Conf. of Structural Engineering and Construction.** Lisse, The Netherlands: Balkema Publisher, 2003.

JUNNILA, S. Life cycle assessment of environmentally significant aspects of an office building. Nordic **Journal of Surveying and Real Estate Research**, Special Series, v. 2, p. 81-97, 2004.

JUNNILA, S.; HORVATH, A. Life cycle environmental effects of an office building. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 9, n. 4, p. 157-166, 2003.

JUNNILA, S.; HORVATH, A.; GUGGEMOS, A. A. Life-cycle assessment of office buildings in Europe and the United States. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 12, n. 1, p. 10-17, 2006.

KHASREEN, M. M.; BANFILL, P. F. G.; MENZIES, G. F. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review. **Sustainability**, v. 1, n. 3, p. 674-701, 2009.

KOFOWOROLA, O. F.; GHEEWALA, S. H. Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 10, p. 1076-1083, 2009.

KOTAJI S., SCHUURMANS A., EDWARDS S. **Life-cycle assessment in building and construction:** a state-of-the-art report. Florida: SETAC press. 2003.

LAMBERTS, R. et al. **Sustentabilidade nas edificações:** contexto internacional e algumas referências brasileiras na área. Florianópolis: LABEEE - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2008.

LEITE, V. F. **Certificação Ambiental na Construção Civil:** sistemas Leed e Aqua. 2001. 50p. (Trabalho de Conclusão de Curso)- Curso de Graduação de Engenharia Civil. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2011.

LEVINE, M., et al. **Residential and commercial buildings**. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge/New York: Cambridge University, Estado Unidos, 2007.

LI, Z. A new life cycle impact assessment approach for buildings. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1414-1422, 2006.

MOS arquitetos e associados. Disponível em : <<http://www.mosarquitetos.com.br/portfolio>>. Acessado em: 16 de agosto de 2015.

NEMRY, F.; UIHLEIN, A. **Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building)**. EUR 23493 EN. Seville, Spain: European Commission, Joint Research Center, 2008.

OLIVEIRA, W. **LEED previsto x LEED realizado: o desafio da performance**. Conferência GreenBuilding Brasil, São Paulo, 2014.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28-39, 2009.

OWENS, B. et al. **LEED V4 Impact Category and Point Allocation Development Process**. 2013. Disponível em; <<http://www.usgbc.org/resources/leed-v4-impact-category-and-point-allocation-process-overview>>.

PRADO, M. R.; KASKANTZIS NETO, G. K.. A análise do Ciclo de Vida como ferramenta de otimização de processos e gestão ambiental. **Voos Revista Polidisciplinar Eletrônica da Faculdade Guairacá**, v. 1, n. 1, 2011.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro7 life-cycle assessment software package**, version 7.3.2. Amersfoort, The Netherlands. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com>>. Acessado em: 02 de setembro de 2015.



PULLEN, S. Energy assessment of institutional buildings. **Proceedings of Annual Conference of the Australia & New Zealand Architectural Science Association (ANZAScA)**, The University of Adelaide, Australia, 2000.

RAMESH, T.; PRAKASH, R; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, 2010.

RAYNSFORD, Nick. The UK's approach to sustainable development in construction. **Building Research & Information**, v. 27, n. 6, p. 419-423, 1999.

REICHARDT, T. F. **Technical and Economic Assessment of Medium Sized Solar-Assisted Air-Conditioning in Brazil**. 2010. 135 p. (Dissertação de Mestrado) - Engenharia Urbana e Ambiental, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

RODE, P.; BURDETT, R.; GONÇALVES, J.C. S. Buildings: investing in energy and resource efficiency. 2011. In: United Nations Environment Programme (UNEP). **Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication**. Geneva: UNEP, 2011. p. 331-373.

ROUX, P. et al. Life Cycle environmental Assessment (LCA) of sanitation systems including sewerage: Case of Vertical Flow Constructed Wetlands versus activated sludge. In: **12th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**. Oct 2010, Venise, Italy. IWA - Palombi Editori, 2, p. 879 - p. 887, 2010.

SAIC, Scientific Applications International Corporation. **Life cycle assessment: principles and practice**. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, USEPA. 2006.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and buildings**, v. 39, n. 3, p. 249-257, 2007.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, G. A.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. **Energy and buildings**, v. 35, n. 10, p. 1049-1064, 2003.

SCOFIELD, J. H. Efficacy of LEED – certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 517-524, 2013.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. Interfacehs - **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, São Paulo, v. 1, n. 1. ago 2006.

SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. **A Technical Framework for Life- Cycle Assessment**. Em Fava, J., Denison, R., Jones, B., Curran, M., Vigon, B., Selke, S. e Barnum, J. (Eds.). Workshop report from the Smugglers Notch. Vermont, SETAC, Estados Unidos. 1991.

SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. **Guidelines for Life Cycle Assessment: A "Code of Practice"**. Brussels: SETAC. 1993.

SHARMA, A. et al. Life cycle assessment of buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 871-875, 2011.

SHEN, T. **Industrial Pollution Prevention**. 1995. p. 143 – 161.

SIGNOR, R. **Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras**. 1999. 314p. (Tese de Doutorado)- Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SILVA, L. P. **Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social**. 2012. 182p. (Dissertação Mestrado) - Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre. 2012.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. 2003. 210p. (Tese de Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, V.G.; SILVA, M.G; AGOPYAN, V. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade. **Revista Ambiente Construído** - ANTAC, Porto Alegre, v. 3,n. 3,p 7-18, jul./set. 2003.

SOARES, E. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2011. 133p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil**. Coletânea Habitare, v. 7. Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 96-127.

SOUSA, S. R. **Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida**. 2008, 73 p. (Dissertação Mestrado) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

STEIN, R. G.; SERBER, D.; HANNON, B. Energy use for building construction. In: **RG Stein and Associates. US Department of Energy, EDRA Report**. Center for Advanced Computation, University of Illinois, 1976.

SUH, S. **MIET 3.0 User Guide: An Inventory Estimation Tool for Missing Flows using Input-Output Techniques**. CML, Leiden University, 2003.

SUZUKI, M.; OKA, T. Estimation of life cycle energy consumption and CO 2 emission of office buildings in Japan. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 1, p. 33-41, 1998.

TAVARES, S.F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006, 224 p. (Tese de

doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.. Florianópolis, 2006.

THORMARK, C. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. **Building and environment**, v. 37, n. 4, p. 429-435, 2002.

TOSTA, C. S. **Inserção da Análise do Ciclo de Vida no Estado da Bahia através da atuação do Órgão Ambiental**. 2004, 188 p. Dissertação (Mestrado Profissional) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

TRELOAR, G. et al. Analysing the life-cycle energy of an Australian residential building and its householders, **Building Research & Information**, 28 (3), pp. 184-195, 2000.

TRELOAR, G. et al. Building materials selection: greenhouse strategies for built facilities. **Facilities**, v. 19, n. 3/4, p. 139-150, 2001.

TRUSTY, W.;MEIL, J. The environmental implications of building new versus renovating an existing structure. **CIB International Conference. on Sustainable Building 2000**, Aeneas Technical Publishers, Boxtel, The Netherlands, 104–106, 2000.

RAYNSFORD, N. The UK's approach to sustainable development in construction. *Build Res. Inf.* 1999, 27, 419-423.

UNEP, United Nations Environment Programme. **Greening The Building Supply Chain**. Sustainable Buildings and Climate Initiative. 2014.

UNEP, United Nations Environment Program. **Life cycle assessment: what it is and how to do it**. 1. ed. Paris: United Nations Publication, 1996. 92 p.

UNEP, United Nation Environment Programm; SETAC, Society Of Environmental Toxicology And Chemistry. **Guidelines for social life cycle assessment of products**. United Nations Environment Programme. ISBN, p. 978-92, 2009

USGBC, United States Green Building Council. **LEED Reference Guide for Building Design and Construction, LEED v4**. Disponível em: <<http://www.usgbc.org/leed>>. Acessado em 16 de agosto de 2015.

VALT, R.B.G. **Análise do ciclo de vida de embalagens pet, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais**. 2004. 193 p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

VIGON, et al. **Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles**. Cincinnati, U.S. Environmental Protection Agency, Risky Reduction Engineering Laboratory, USEPA. 1993.

WINES, J. **Green Architecture**. Milan : Taschen, 2000. 240p.

WINISTORFER, P. et al. Energy consumption and greenhouse gas emissions related to the use, maintenance, and disposal of a residential structure. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 128-139, 2005.

WU, H. J. et al. Life cycle energy consumption and CO2 emission of an office building in China. **The international journal of life cycle assessment**, v. 17, n. 2, p. 105-118, 2012.

XING, S.; XU, Z.; JUN, G. Inventory analysis of LCA on steel-and concrete-construction office buildings. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1188-1193, 2008.

YAMTRAIPAT, N. et al. Assessment of Thailand indoor set-point impact on energy consumption and environment. **Energy policy**, v. 34, n. 7, p. 765-770, 2006.

YOHANIS, Y. G.; NORTON, B. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK. **Energy**, v. 27, n. 1, p. 77-92, 2002.

ZHANG, Z. et al. BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model. **Building and Environment**, v. 41, n. 5, p. 669-675, 2006.



## **APÊNDICE - Medidas Mitigadoras**

As medidas mitigadoras aqui apresentadas são proposições de melhorias das atividades causadoras de maior impacto ambiental do edifício analisado e visam reduzir o dano ambiental da fase de uso deste, mas servem de base referencial para a operação de qualquer outro edifício comercial. As soluções apresentadas são reflexos das melhores técnicas utilizadas no Brasil e no mundo, suportadas por evidências científicas e recomendações literárias.

A decisão de quais medidas adotar pode ser guiada pelas sugestões descritas, mas é preciso a avaliação de especialistas para definir qual escolha é mais compatível para o edifício especificamente, além de ser necessária a análise de outras esferas, como a econômica e a social, antes de aplicá-las

### **Melhorias de eficiência energética:**

Diversas técnicas de design podem ser utilizadas para melhorar a eficiência energética de edificações. No caso do edifício em questão, este já está consolidado e muitas dessas técnicas foram definidas na fase de projeto, as quais lhe atribuíram a sustentabilidade. Portanto, neste estudo buscou-se propor a minimização do consumo de energia por outros meios, adequados para aplicação durante a fase de uso, e não antes dela.

Assim, chegou-se à conclusão que a energia necessária para a operação pode ser consideravelmente reduzida com o aperfeiçoamento do isolamento térmico da envoltória (THORMARK, 2001). A perda por troca de calor pode ser minimizada com a substituição de vidros das janelas por modelos que deixem passar mais radiação na faixa de luz visível e menos na do infravermelho, como o envidraçamento duplo, isolamento adicional da cobertura e/ou da fachada e vedações para reduzir a infiltração de ventilação. O estudo feito por Nemry e Uihlein (2008) contém instruções, custos e exemplos detalhados de como implantar cada uma dessas técnicas de isolamento.

A conclusão desses autores, depois de analisar essas medidas em cenários de ACV, foi de que elas têm o potencial de reduzir em pelo menos 20% a emissão de gases de efeito estufa. Fay, Treloar e Iyer-raniga (2000) verificaram uma redução de 30% da energia térmica operacional devido à adição de mais isolamento nas paredes e telhados em um estudo de caso de ACV na Austrália e concluíram que esta é uma medida de bom custo/benefício à longo prazo para poupar energia.

Contudo, Treloar et al. (2001) ainda são a favor do envidraçamento duplo devido ao seu rápido *payback* energético e financeiro.

A integração de energia solar renovável ao edifício é considerada uma das medidas mais ideais para o estabelecimento. A energia solar pode ser aproveitada, por meio de coletores, como energia térmica para aquecer a água ou para gerar eletricidade, através de painéis fotovoltaicos. Além disso, o local conta com uma área plana, ao lado do edifício, bastante adequada à integração de coletores/painéis, caso seja necessária uma área maior que a fachada ou cobertura.

A energia solar é considerada uma fonte não poluente, pois troca-se parte do consumo da eletricidade da rede, por vezes gerada com parcela de combustíveis fósseis, por uma energia exclusivamente renovável produzida no local. Se implantados coletores térmicos, possivelmente, toda a eletricidade gasta para aquecer a água pode ser evitada em dias de sol.

A geração de energia solar é otimizada para edifícios comerciais em que a maior demanda ocorre nas horas da grande disponibilidade de radiação solar. Esse horário corresponde, atualmente, ao horário de maior demanda nacional de energia no edifício motivo pelo qual essa tecnologia tem o potencial de reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> ao minimizar o sobrecarregamento dos sistemas de geração hidráulica, evitando que se insira na rede mais energia produzida pela queima de combustíveis fósseis das termoeletricas (REICHARDT, 2010).

Essa tecnologia tem a desvantagem de demandar um alto investimento, sendo que os coletores solares possuem um preço mais acessível que os painéis fotovoltaicos. Porém, com o mercado renovável crescendo a cada ano, a tecnologia e a eficiência dos painéis (cerca de 5 a 10%) têm se desenvolvido, tornando os preços mais acessíveis e com boas taxas de retorno (SCHEUER, KEOLEIAN e REPPE, 2003).

Uma vez que o ar condicionado é responsável pela maior demanda de energia (53%), técnicas que reduzam a necessidade de refrigerar o ambiente devem também ser alvo de prioridade neste estudo. Uma excelente solução para diminuir o uso de ar-condicionado é controlar a incidência solar, para evitar que a radiação aqueça o prédio internamente. Para tanto, uma das soluções mais efetivas é a implantação de elementos que protejam as fachadas mais expostas a insolação ou redirecionem a luz. São exemplos os dispositivos de sombreamento exterior, também chamados de brises (BALARAS et al., 2002).

Esse sistema é instalado em fachadas de vidro ou janelas e controla a troca de calor com o ambiente interno. Além desse



dispositivo, a readequação das janelas para vidros semitransparentes com películas solares também auxilia na redução da passagem de calor. Essa mesma solução de sombreamento pode ser alcançada com o plantio de árvores caducifólias que, durante o verão, propiciam sombra ao edifício e no inverno, quando as folhas caem, favorecem a incidência solar direta.

Outra sugestão é implantação de ventiladores de teto, que podem reduzir o consumo de energia do condicionamento de ar e emitem menor quantidade de CO<sub>2</sub>. Além disso, os aparelhos de ar condicionado devem ter a maior eficiência possível (certificação PROCEL 'A') e os dutos e linhas de refrigeração devem ser isolados e planejados para maximizar a eficiência (CAIRNS REGIONAL COUNCIL, 2011).

Outra medida simples para diminuir a energia requerida para refrigeração e que pode ser aplicada sem grandes investimentos financeiros é o aumento da temperatura de ajuste (*set-point*) dos aparelhos. Yamtraipat et al. (2006) avaliaram diversos estudos de caso e concluíram que o aumento de 1°C pode reduzir o consumo de energia em 6,17%. A temperatura ótima do *set-point* para um dia de verão, segundo o ASHRAE (2004)<sup>3</sup>, é de 24,5, com uma variação aceitável de 23 a 26 graus. Portanto, propõe-se o aumento do *set-point* do edifício, atualmente de 21 a 24 graus, para uma média de 23 a 25. Dessa maneira será mantida a zona de conforto humana recomendada e reduzida a demanda de energia em aproximadamente 12%. A adoção dessa medida deve atentar para não perder a qualidade do ambiente interno e nem reduzir a produtividade dos funcionários, principalmente no verão.

Outra forma simples de otimizar o uso do ar condicionado é desliga-los (pelo menos parte deles) no horário de almoço e/ou no horário de pico (das 18 às 21 horas), que além de reduzir os impactos ambientais, poderiam reduzir também os custos, principalmente no horário de pico em que o preço da energia é 3 vezes mais caro.

O uso de aparelhos eletrônicos é a segunda maior demanda de energia. Como a manutenção desses aparelhos tende a crescer exponencialmente no comércio, graças à modernização dos escritórios e, deve-se dar preferência à aquisição de novos equipamentos com alta eficiência - comprovada pelo selo PROCEL de nível A. Além disso, uma forma simples e sem custos adicionais para reduzir esse consumo é desligar todos os equipamentos quando estes não estão sendo utilizados.

---

<sup>3</sup> ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc, 26 p. 2004.

Isso exigirá, no entanto, uma campanha de sensibilização dos funcionários (ou uma central de controle).

Algumas melhorias ainda podem ser feitas também para o sistema de iluminação, como a substituição de lâmpadas por modelos mais eficientes, preferir as do tipo LED ou fluorescente, e com sensores de presença. Esse tipo de dispositivo chega a economizar até 35% de energia (BALARAS et al., 2002).

Um estudo recente de 5375 edifícios comerciais nos Estados Unidos mostrou que a eficiência energética da iluminação, ventilação, condicionamento de ar e sombreamentos pode atingir até 64% de redução de energia (GRIFFITH et al. 2006).

### **Melhorias dos meios de transporte:**

A melhor forma de minimizar os impactos causados pelo transporte de funcionários é através da redução do número de rotas feitas por automóveis. Para isso é preciso encorajar os funcionários a usarem transportes alternativos, como bicicleta, caminhada ou transporte público que, no caso de Florianópolis, se limita a ônibus.

Outra solução é incentivar, ainda mais, as caronas, evitando o uso de um automóvel por uma única pessoa. Dessa forma, reduz-se o número de carros em circulação equanto mais pessoas por carro, melhor.

Porém, essas medidas têm um fator social complicador, pois disputam com uma cultura enraizada que os brasileiros têm de se deslocar em seu próprio veículo. Logo, adotar essa medida não é tão simples como implantar as medidas tecnológicas de otimização energética, que dependem, na maioria dos casos, apenas da disposição dos responsáveis pelo edifício.

Contudo, a mudança de comportamento dos funcionários pode ser atingida através do oferecimento de alguma forma de incentivo para os que utilizam transportes alternativos, como: adicional de férias, recompensas financeiras, redução do expediente em uma hora, distribuição de passes de ônibus gratuitamente ou com desconto, disponibilização de bicicletas para uso diário, pagamentos extras para quem oferecer carona (como subsídio de combustível, por exemplo), organização de recursos para facilitar a divulgação de caronas e para comunicar outras formas de transporte alternativo.

Algumas estratégias taxativas ou proibitivas também podem ser eficazes, como cobrar estacionamento e reduzir o número de vagas. Para compensar, o estabelecimento poderia proporcionar uma van ou ônibus exclusivo para os funcionários que moram em determinada região, por

exemplo no centro da cidade, reduzindo de forma significativa o número de automóveis em rotatividade, pois ambos podem levar em torno de 15 ou mais pessoas em um único veículo.

Outro fator que tem relevância, é o tipo de combustível utilizado. Motivar o abastecimento com combustível renovável, como álcool e biodiesel, é uma boa forma de minimizar os impactos ao meio. Para alcançar todas essas medidas, é preciso estabelecer um programa de conscientização dos funcionários.

Os impactos advindos do transporte também são diretamente proporcionais à distância percorrida pelos funcionários até o local de trabalho. Funcionários que se deslocam de locais distantes do empreendimento, fora da região de Florianópolis, tendem a somar mais impactos. Portanto, o empreendimento pode dar preferência à contratação de funcionários que morem próximos ao empreendimento e que possam ir a pé ou de bicicleta.